



**Pedro Miguel Pires Cabral**

Licenciado em Ciências da Engenharia Mecânica

## **Projeto de equipamento de laboratório para o estudo de reações bioquímicas**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica

Orientador: Doutor Filipe Tiago de Oliveira, Professor Auxiliar da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

Coorientador: Doutor João Mário Burguete Botelho Cardoso, Professor Auxiliar da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

Júri:

Presidente: Doutora Raquel Albuquerque Soares Brás de Almeida, Professora Auxiliar da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

Vogais: Doutor Rui Fernando dos Santos Pereira Martins, Professor Auxiliar da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa;

Doutor Filipe Alexandre Ferreira Tiago de Oliveira, Professor Auxiliar da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

**Março, 2019**



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA



Projeto de equipamento de laboratório para o estudo de reações bioquímicas  
Copyright © Pedro Miguel Pires Cabral, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



Dedicado à minha família.



## Agradecimentos

Em primeiro lugar quero expressar o meu agradecimento ao meu orientador o professor Filipe Tiago, por me proporcionar a hipótese de desenvolver este projeto e ao coorientador professor João Cardoso, por todo o apoio dado não só ao longo deste projeto como no decorrer do curso. Um agradecimento muito especial também ao professor Joaquim Branco, do Centro de Ciências e Tecnologias Nucleares da Universidade de Lisboa, por toda a ajuda que deu no desenvolvimento deste projeto.

Quero agradecer à Faculdade de Ciências e Tecnologias por toda a formação adquirida ao longo destes anos e pelo excelente ambiente universitário que me proporcionou.

Quero também fazer um agradecimento especial aos meus colegas Guilherme Liz e Filipe Almeida, sem eles todo este percurso não tinha sido possível. Um obrigado muito especial ao Gui que me forneceu os meios necessários para conseguir acabar a dissertação da melhor forma.

Finalmente, quero também agradecer à minha família em especial aos meus pais e avós, que ao longo destes anos sempre apostaram em mim e no meu futuro, tendo me dado inúmeros conselhos que me permitiram chegar a esta fase e um apoio incondicional. Obrigado!





## Resumo

Este trabalho tem como objetivo o projeto de um equipamento autoclave, mais precisamente um reator de alta pressão, no qual será possível estudar o produto da reação entre dois reagentes, sujeito a condições de elevadas pressões e temperaturas. Este equipamento permitirá realizar a prova de conceito sobre a utilização de ferritinas na extração de metais libertados por fontes hidrotermais submarinas. A utilização destas proteínas para a obtenção de metais existentes no fundo dos oceanos pode revelar-se uma solução mais económica e mais sustentável do ponto de vista ambiental, comparativamente às outras alternativas para este tipo de mineração. No entanto, é necessário realizar um conjunto de testes de modo a conhecer o comportamento destas proteínas quando sujeitas às condições existentes junto destas fontes hidrotermais, onde as temperaturas rondam os 300 °C e as pressões dependem da profundidade a que estas se encontram, sendo que normalmente pode variar entre 1 e 5 Km. Não sendo viável realizar estes estudos no fundo do oceano, surgiu a necessidade de desenvolver um equipamento que permita simular estas condições em laboratório.

Para que as análises realizadas com este equipamento possam fornecer resultados fiáveis relativamente ao comportamento das proteínas, é necessário garantir que as reações apenas ocorram quando impostas as condições de pressão e temperatura pretendidas para cada ensaio. Desta forma, o equipamento deverá contemplar um sistema de mistura dos reagentes que permita ao operador controlar a altura em que se dá o início da reação. Por outro lado, para preservar os resultados do produto de reação obtido nessas condições, é necessário interromper a reação através de um processo de congelação rápida, pelo que irá contemplar também um sistema de congelação em azoto líquido.

No decorrer deste trabalho será apresentada a metodologia de projeto deste equipamento, que engloba: o pensamento adotado durante a sua conceção; a razão de algumas das opções tomadas ao longo da realização do trabalho; as análises de elementos finitos, onde se pretende simular as condições de funcionamento do equipamento. Seguem-se algumas sugestões de cuidados a ter para uma correta montagem e utilização do equipamento.

**Palavras-chave:** Autoclave; Análise de reações bioquímicas; Laboratório; Elevada pressão; Elevada temperatura.



## Abstract

The purpose of this dissertation is the project of an autoclave, most commonly known as high pressure reactor, which is designed to study a specific reaction between two reagents subjected to extreme conditions of pressure and temperature. This equipment will allow us to study the possibility of using ferritin proteins to extract metals released by submarine hydrothermal vents. This application may reveal a more sustainable and environmentally friendly solution for the seafloor mining industry. This equipment will allow to have a deeper understanding about the behaviour of these proteins when subjected to the conditions near the vents, where the temperatures are ca. 300 °C and the pressure depends on the depth where they are found, which normally varies between 1 and 5 km. Since it is not possible to perform these studies at the seafloor, it is very important to have an equipment that allow us to simulate these extreme conditions in a laboratory.

To assure the results reliability, about the behaviour of these proteins at the conditions being studied, the equipment must guarantee that the mix of the reagents only occurs at the required conditions of pressure and temperature. Therefore, this equipment has a system that allows its operator to control the time when the reaction starts. On the other hand, it is also required to collect the product of the reaction and preserving its integrity. This will be achieved by rapid freeze-quenching the sample in a liquid nitrogen bath.

In this thesis, the project methodology will be described following these main topics: the overall design process; the reasoning behind the adopted solutions; the finite element analysis to simulate the working conditions of the equipment. It follows some suggestions regarding the correct assembly and the proper handling of the equipment.

**Keywords:** Autoclave; Study of biochemical reactions; Laboratory; High pressure; High temperature.



# Índice geral

Agradecimentos.....	v
Resumo.....	vii
Abstract .....	ix
Índice de figuras .....	xiii
Índice de tabelas .....	xvii
Índice de siglas .....	xix
Capítulo 1.Introdução.....	1
1.1. Contextualização do problema .....	1
1.2. Objetivos .....	5
1.3. Revisão bibliográfica.....	5
1.4. Estrutura da dissertação.....	9
Capítulo 2.Metodologia de projeto.....	11
2.1. Requisitos de projeto .....	11
2.2. Anteprojeto.....	12
2.3. Materiais utilizados .....	20
2.4. Projeto de detalhe .....	21
2.4.1. Sistema de controlo do início de reação .....	22
2.4.2. Sistema de controlo de temperatura .....	32
2.4.3. Sistema de controlo de pressão .....	33
2.4.4. Reservatório .....	39
2.4.5. Tampa do reator .....	46
2.4.6. Ligação entre a tampa e o reservatório.....	49
2.5. Montagem do equipamento .....	56
Capítulo 3.Análises de elementos finitos .....	61
Capítulo 4.Operação do equipamento .....	69
Capítulo 5.Conclusão .....	71
Bibliografia .....	73
Anexos.....	I
Apêndice .....	XII



# Índice de figuras

Figura 1.1 - Mapa mundo com a localização das principais zonas onde foi descoberta a existência de fontes hidrotermais submarinas ou comprovada a sua existência através da deteção de composições químicas características, na coluna adjacente .....	1
Figura 1.2 - Formação de uma fumarola negra e representação das reações químicas que ocorrem entre os minerais expelidos e a água do mar .....	2
Figura 1.3 - Ideia geral da tecnologia que a empresa Nautilus Minerals pretende implementar para a exploração dos depósitos de sulfuretos no fundo do mar .....	3
Figura 1.4 - Reatores de alta pressão, empresa: (a) Nano-mag; (b) AmAr; (c) Büchiglasuster .....	7
Figura 1.5 - Reservatório cilíndrico e instrumentação no topo.....	7
Figura 1.6 - Válvula de amostragem no fundo do reservatório .....	8
Figura 1.7 - Autoclave com sistema de fecho de rosca .....	8
Figura 1.8 - Câmara interior de autoclave aquecida através de um material condutor .....	9
Figura 2.1 - Reservatório .....	12
Figura 2.2 - Tampa do reator .....	12
Figura 2.3 - Sistemas de controlo do equipamento; (a) Sistema de controlo do início da reação; (b) Sistema de controlo de temperatura; (c) Sistema de controlo de pressão .....	13
Figura 2.4 - Copo do reagente .....	14
Figura 2.5 - Válvula solenoide .....	14
Figura 2.6 - Válvula de depósito .....	15
Figura 2.7- Ligação do sistema de controlo do início de reação. ....	16
Figura 2.8 - Exemplo de diferentes tipos de termopares .....	16
Figura 2.9 - Exemplos de resistências com hipótese de ligação roscada.....	17
Figura 2.10 - Funcionamento de uma válvula de retenção .....	19
Figura 2.11 - Conexão do tipo Swagelok Medium-Pressure Tube Fittings – FK Series .....	20
Figura 2.12 - Elementos do Sistema de controlo do início da reação. ....	22
Figura 2.13 Demonstração das zonas do reator sujeitas à pressão de projeto e a pressão ambiente. ....	23
Figura 2.14 - Dimensões características de um O-Ring .....	25
Figura 2.15 - Montagem estática de um O-Ring no exterior de um veio e respetivas tolerâncias.....	26
Figura 2.16 - Dimensões do chanfro do veio para facilitar a introdução do O-Ring .....	26
Figura 2.17 - Geometria da zona da tampa correspondente a ligação com o sistema de início da reação..	28
Figura 2.18 - Dimensões relevantes para o cálculo da altura do reagente no interior do copo.....	29
Figura 2.19 - Dimensões do copo do reagente. ....	30
Figura 2.20 - Dimensões disco da válvula de depósito.....	30
Figura 2.21 - Dimensões válvula de depósito.....	31
Figura 2.22 - Dimensões da manivela da válvula de depósito.....	31
Figura 2.23 - Dimensões do forno. ....	32
Figura 2.24 - Dimensões proteção termopar.....	33
Figura 2.25 - Parte do sistema relativa ao controlo de pressão no interior do reator. ....	34
Figura 2.26 – Parte do sistema relativa ao controlo da solução no interior do reator. ....	36
Figura 2.27 – Circuito de pressão do equipamento. ....	38

Figura 2.28 - Dimensões do reservatório equivalente utilizado no cálculo da espessura. ....	39
Figura 2.29 - Planos de corte do reservatório equivalente. ....	40
Figura 2.30 - Semi-corpos obtidos a partir da interceção do reservatório equivalente pelos planos A e B. ....	40
Figura 2.31 - Dimensões do reservatório equivalente, utilizado na análise de elementos finitos para determinação da espessura. ....	41
Figura 2.32 - Análise para obtenção da espessura, iteração para $t_R = 4$ mm.. ....	42
Figura 2.33 - Análise para obtenção da espessura, iteração para $t_R = 5$ mm. ....	43
Figura 2.34 - Análise para obtenção da espessura, iteração para $t_R = 6$ mm.. ....	43
Figura 2.35 - Dimensões do fundo do reservatório .....	44
Figura 2.36 - Dimensões geométricas dos triângulos representativos do volume do fundo do reservatório. ....	45
Figura 2.37 - Dimensões reservatório.....	46
Figura 2.38 - Dimensões gerais da tampa do reservatório.....	46
Figura 2.39 – Esquema da ligação soldada entre o tubo de admissão de pressão no reator e a sua tampa, e forças envolvidas. ....	47
Figura 2.40 - Dimensões da zona central da tampa do reator.....	48
Figura 2.41 - Montagem de um O-Ring para o caso de deformação axial, com pressão no interior e respetivas tolerâncias.....	49
Figura 2.42 - Dimensões características de um parafuso de cabeça sextavada interior, totalmente roscado .....	50
Figura 2.43 - Ligação aparafusada, caso específico de carregamento paralelo aos eixos do parafuso .....	52
Figura 2.44 - Equilíbrio de forças na ligação aparafusada, após aplicação da pressão no interior do reator .....	52
Figura 2.45 - Ligação aparafusada e zona de deformação uniforme dos elementos comprimidos.....	53
Figura 2.46 - Dimensões da aba do reservatório. ....	55
Figura 2.47 - Dimensões da zona exterior da tampa do reator. ....	56
Figura 2.48 - Ligações soldadas dos tubos à tampa e ao fundo do reservatório. ....	57
Figura 2.49 - Montagem do sistema de início de reação na tampa do reator.....	57
Figura 2.50 – Montagem da válvula de retenção no fundo do reservatório.....	58
Figura 2.51 - Montagem da válvula de segurança na tampa do reator. ....	58
Figura 2.52 - Montagem do reator no interior do forno.....	59
Figura 2.53 - Montagem final do equipamento. ....	60
Figura 3.1 - Geometria utilizada nas análises de elementos finitos. ....	61
Figura 3.2 - Malha de elementos finitos utilizada para análises. ....	62
Figura 3.3 - Localização dos sensores de temperatura utilizados na análise térmica transiente. ....	63
Figura 3.4 - Gráfico com a representação do funcionamento do forno ao longo do tempo.....	64
Figura 3.5 - Temperaturas registadas pelos sensores ao longo do tempo. ....	64
Figura 3.6 - Propagação da temperatura nos diversos componentes do reator ao longo do tempo. ....	65
Figura 3.7 - Localização e direção dos constrangimentos considerados na análise estrutural.....	65
Figura 3.8 - Distribuição de tensões devido à força de pré-carga aplicada nos parafusos.....	66
Figura 3.9 - Distribuição de tensões após a aplicação de pressão no interior do reator.....	66



Figura 4.1 - Montagem geral do equipamento; (1) e (2) válvula de agulha duas vias; (3) válvula de depósito; (4) válvula de agulha três vias; (a) e (b) manómetro analógico.....	69
Figura 4.2 - Montagem dos parafusos na tampa.....	70



## Índice de tabelas

Tabela 1.1 - Apresentação de diversas empresas comerciantes de autoclaves, suas aplicações e gamas de funcionamento. ....	6
Tabela 2.1 - Requisitos de projeto .....	11
Tabela 2.2 - Composição química aço Inox 316 .....	20
Tabela 2.3 - Propriedades Aço Inox 316 .....	21
Tabela 2.4 - Dimensões nominais rosca M5.....	23
Tabela 2.5 - Especificações O-Ring de selagem do sistema de controlo do início da reação.....	26
Tabela 2.6 - Dimensões relativas à introdução do O-Ring no sistema de controlo de início da reação. ....	27
Tabela 2.7 - Acabamentos superficiais sugeridos para a montagem de O-Rings .....	27
Tabela 2.8 - Dimensões nominais rosca M16.....	28
Tabela 2.9 - Especificações dos tubos aço inox – Série FK .....	34
Tabela 2.10 - Referências dos elementos de controlo de pressão no interior do reator .....	35
Tabela 2.11 - Especificações dos tubos aço inox – Série IPT .....	37
Tabela 2.12 - Referências dos elementos de controlo da solução no interior do reator .....	37
Tabela 2.13 - Referências dos elementos do circuito de pressão.....	39
Tabela 2.14 - Dimensões do rasgo para à introdução do O-Ring no topo do reservatório .....	49
Tabela 2.15 - Especificações O-Ring de selagem da ligação entre o reservatório e a sua tampa .....	50
Tabela 2.16 - Dimensões nominais de uma rosca M6 com passo grosso .....	51
Tabela 2.17 - Dimensões de um parafuso M6 de cabeça sextavada interior, totalmente roscado .....	51



## Índice de siglas e símbolos

$P_p$	Pressão de projeto;
$P_{atm}$	Pressão atmosférica;
$P_s$	Pressão de segurança;
$T_p$	Temperatura de projeto;
$V_r$	Volume de reagente;
$V_s$	Volume de produto de reação;
$\sigma_c$	Tensão de cedência;
$\sigma_r$	Tensão de rotura;
$\sigma_{ADM}$	Tensão admissível;
$\sigma_{c,p}$	Tensão de cedência dos parafusos;
$n$	Fator de segurança;
$E$	Módulo de Young;
$p$	Passo nominal da rosca;
$l$	Passo aparente da rosca;
$\alpha$	Ângulo de rosca;
$d$	Diâmetro nominal da rosca;
$d_m$	Diâmetro médio da rosca;
$d_i$	Diâmetro interior da rosca;
$H$	Altura do par roscado;
$d_v$	Diâmetro da válvula de depósito;
$A_v$	Área de secção do corpo da válvula de depósito;
$F_v$	Força aplicada no eixo da válvula de depósito;
$F_{1 \text{ máx.m}}$	Força máxima admissível considerando o primeiro modo de falha característico das ligações roscadas, para o elemento macho;
$F_{2 \text{ máx.m}}$	Força máxima admissível considerando o segundo modo de falha característico das ligações roscadas, para o elemento macho;
$F_{2 \text{ máx.f}}$	Força máxima admissível considerando o segundo modo de falha característico das ligações roscadas, para o elemento fêmea;
$F_{3 \text{ máx.mf}}$	Força máxima admissível considerando o terceiro modo de falha característico das ligações roscadas, para os elementos macho e fêmea;
$T_a$	Momento de aperto;
$T_d$	Momento de desaperto;
$\mu$	Coefficiente de atrito;
$d_1$	Diâmetro interior do O-Ring;
$d_2$	Diâmetro de secção do O-Ring;

$d_3$	Diâmetro exterior do O-Ring;
Z	Altura do chanfro para introdução do O-Ring num veio;
B	Largura do rasgo do O-Ring;
T	Altura do rasgo do O-Ring;
$d_{ic}$	Diâmetro interior do copo do reagente;
$d_c$	Diâmetro do copo do reagente;
$h_c$	Altura do copo do reagente;
$h_r$	Altura de reagente;
PF	Pressão de funcionamento dos componentes do sistema de pressão;
OD	Diâmetro exterior do tubo;
$D_R$	Diâmetro exterior do reservatório;
$D_R$	Diâmetro interior do reservatório;
$T_R$	Espessura do reservatório;
$L_R$	Comprimento do reservatório equivalente;
$V_C$	Volume do cone;
$V_{fC}$	Volume do fundo cónico do reservatório;
$V_r$	Volume de reagente;
$V_{s.c}$	Volume da solução na zona cilíndrica do reservatório;
$h_{s.c}$	Altura da solução na zona cilíndrica do reservatório;
$F_c$	Força aplicada no cordão de soldadura;
$h_c$	Altura do cordão de soldadura;
$\Delta_x$	Comprimento soldado;
$F_i$	Força inicial aplicada nos parafusos;
N	Número de parafusos;
$A_p$	Área de secção dos parafusos;
$l_p$	Comprimento tracionado;
$l_t$	Comprimento dos elementos comprimidos;
$K_p$	Rigidez dos parafusos;
$K_t$	Rigidez dos elementos comprimidos;
C	Razão entre a rigidez do parafuso e a rigidez total da ligação aparafusada;
$F_p$	Força no parafuso;
$F_t$	Força nos elementos comprimidos;
P	Força exercida pela pressão na tampa do reator;
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i> ;
MIG	<i>Metal Inert Gas</i> ;
MAG	<i>Metal Active Gas</i> .

# Capítulo 1. Introdução

O presente capítulo tem como objetivo dar a conhecer ao leitor as motivações que levaram à execução deste equipamento do tipo autoclave. Com esse fim, numa primeira fase será apresentado o contexto em que se enquadra este projeto, identificando os requisitos que servirão de base para a conceção dos diferentes componentes do equipamento. Segue-se um breve resumo dos objetivos inerentes a este trabalho. Finalmente, será apresentado um levantamento bibliográfico, onde se pretende dar a conhecer os diferentes modelos de autoclaves existentes no mercado, realçando algumas das suas características, cuja integração neste projeto se possa revelar interessante.

## 1.1. Contextualização do problema

Ao longo de vários séculos o ser humano tem vindo a explorar os recursos existentes na superfície terrestre. Os recursos metálicos em particular tiveram uma grande importância no seu desenvolvimento, caracterizando até algumas fases da pré-história como a idade dos metais, período que engloba a idade do cobre, idade do bronze e a idade do ferro. Nos últimos séculos a exploração destes recursos tem vindo a aumentar em larga escala devido ao aumento do consumo e ao aparecimento de novas tecnologias, como é exemplo a atual procura de lítio para a construção de baterias.

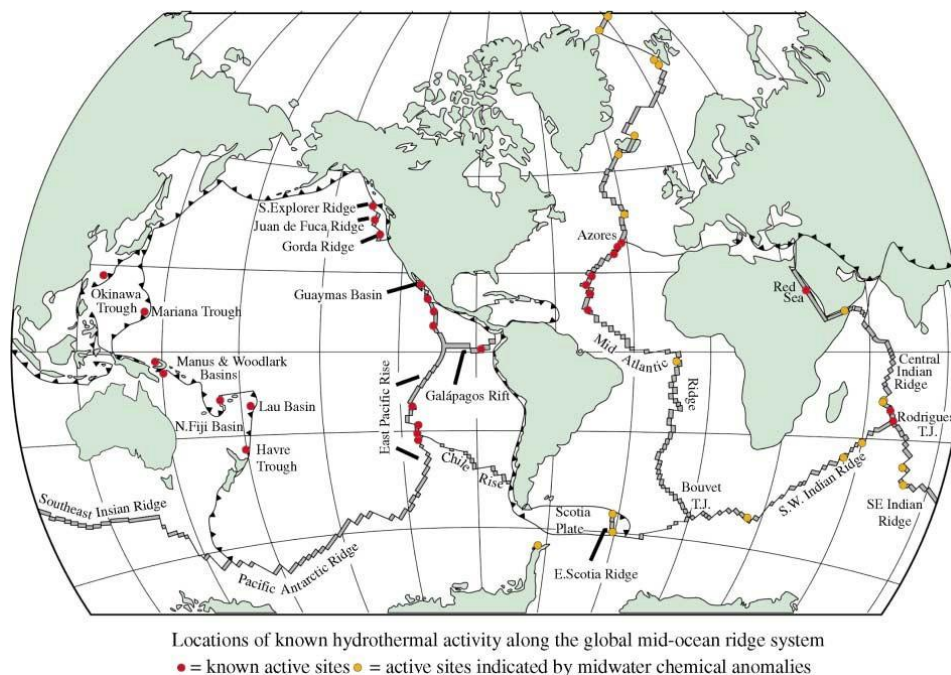


Figura 1.1 - Mapa mundo com a localização das principais zonas onde foi descoberta a existência de fontes hidrotermais submarinas ou comprovada a sua existência através da deteção de composições químicas características, na coluna adjacente.[1]

Em 1977, no arquipélago de Galápagos, foi confirmada a existência de fontes hidrotermais submarinas. Atualmente sabe-se que estas fontes hidrotermais surgem em diferentes zonas do planeta e apresentam diversas morfologias. A sua formação ocorre ao longo das cordilheiras montanhosas submarinas denominadas de dorsais oceânicas (Figura 1.1). Estas zonas são caracterizadas por movimentos tectônicos constantes, resultantes das correntes de magma existentes por debaixo da crosta terrestre. Esses movimentos originam a abertura de fendas no fundo dos oceanos.[1]

A água do mar penetra por estas fendas e vai sendo aquecida à medida que se aproxima das câmaras de magma, onde são atingidas temperaturas que rondam 400 °C. A água, constrangida pela rocha e sujeita a estas temperaturas, irá atingir pressões elevadas sendo de novo expelida para o oceano, formando assim as fontes hidrotermais, também designadas de fumarolas. As fontes hidrotermais podem apresentar diversas morfologias, dependendo do tipo de minerais que são expelidos pelas plumas libertadas para o oceano. Os minerais presentes nessas plumas resultam da erosão da rocha provocada pela circulação da água por entre a crosta terrestre. Algumas fontes libertam para o oceano uma pluma negra rica em diferentes tipos de minerais (Figura 1.2). A este tipo de fumarolas dá-se o nome de fumarolas negras (*black smokers*). Estas existem em diversas zonas do planeta, a profundidades que podem variar entre 1 e 5 km. Os sulfuretos formados nas reações químicas entre os minerais expelidos pelas fumarolas e a água do mar, vão-se depositando em torno destas criando uma zona de rocha sedimentada rica em diferentes materiais.[2]

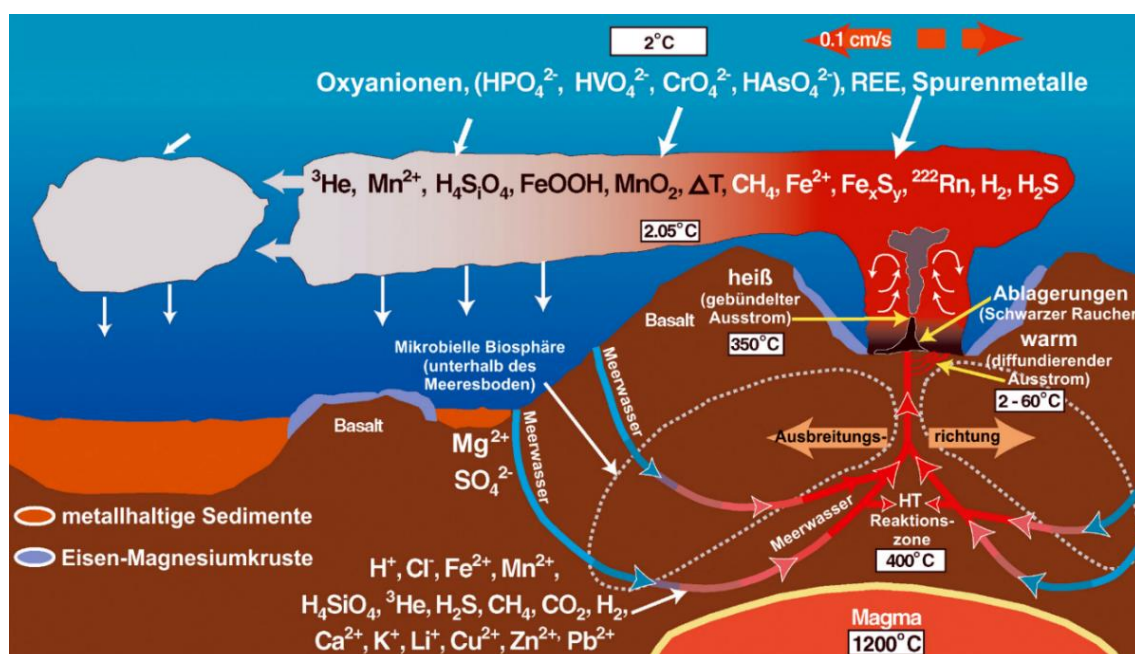
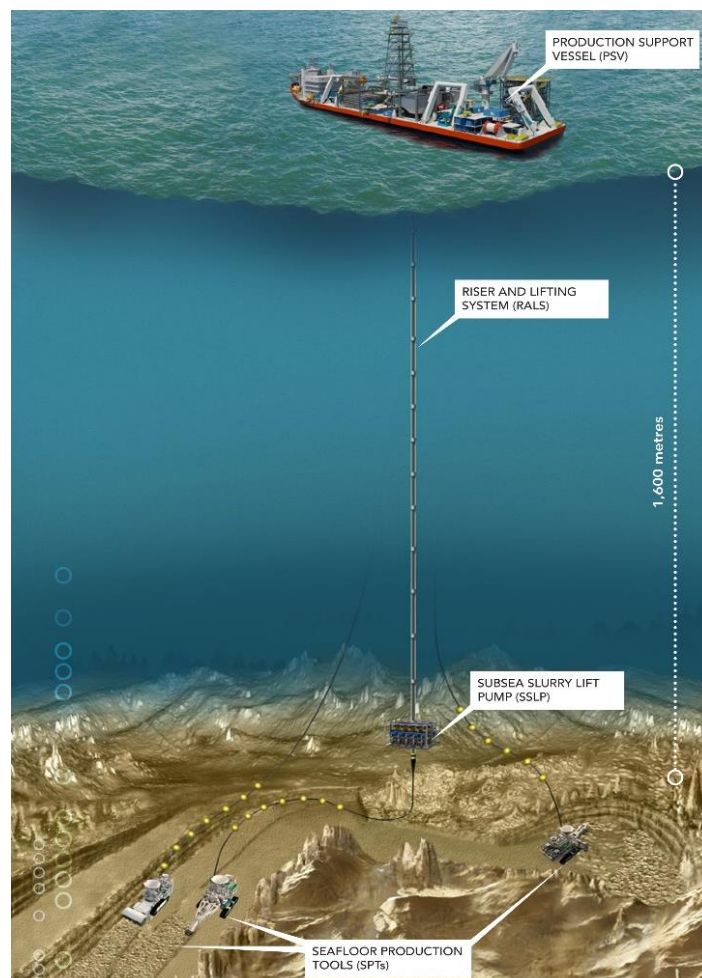


Figura 1.2 - Formação de uma fumarola negra e representação das reações químicas que ocorrem entre os minerais expelidos e a água do mar.[3]



Nos últimos anos, o interesse em explorar o fundo dos oceanos tem vindo a crescer devido aos diversos materiais aí presentes. Uma das propostas apresentadas nesse sentido visa aproveitar os sedimentos ricos em minerais que se vão formando em redor das fumarolas negras. Essa solução, como pode ser observado na Figura 1.3, consiste num total de três estações que em conjunto são responsáveis por todo o processo: remoção da rocha do fundo do oceano; recolha dos sedimentos até à superfície; separação e transporte dos mesmos.[4]

As condições extremas existentes no fundo dos oceanos e a necessidade de equipamentos capazes de suportar essas condições faz com que os custos associados a este método de exploração sejam bastante elevados. Além disso, este método revela-se ainda bastante controverso. Numa primeira fase, porque as zonas em torno destas fumarolas servem de habitat para muitas espécies que dependem destas para viver e este tipo de exploração implica a sua destruição. Numa segunda fase, os efeitos deste tipo de exploração podem vir a ser ainda mais nocivos devido à libertação de elevadas quantidades de detritos para o oceano, contribuindo para que ocorra a propagação de poeiras ricas em diversos minerais num meio aquático que se podem propagar ao longo de grandes distancias com impactos ambientais potencialmente severos.[5]



*Figura 1.3 - Ideia geral da tecnologia que a empresa Nautilus Minerals pretende implementar para a exploração dos depósitos de sulfuretos no fundo do mar.[4]*

Com o intuito de encontrar uma solução mais ecológica e com custos reduzidos, surgiu a ideia de utilizar processos biológicos para recolher metais diretamente das fumarolas através da utilização da proteína ferritina. Uma grande variedade da vida animal, incluindo o ser humano, depende desta proteína para viver, uma vez que a sua função é capturar e armazenar átomos de ferro.[6] A utilização desta proteína revela ainda um interesse particular uma vez que esta pode ser modificada por forma a capturar e armazenar outros elementos, como ouro e prata.[6], [7]

Desta forma, pretende-se estudar a possibilidade de usar as ferritinas para capturar átomos de ferro quando expostas às plumas provenientes das *black smokers*. No entanto, não se conhece o seu comportamento tanto nas condições extremas de pressão ( $>100$  atm) e temperatura ( $< 300$  °C), como para diferentes níveis de pH e salinidade que se observam junto deste tipo de fumarolas. Uma vez que não é viável a realização destes estudos no fundo oceânico, é necessário criar um equipamento que simule as condições acima descritas, tornando assim possível estudar o comportamento das proteínas em laboratório.

Este equipamento deve ser composto por uma zona interior isolada, onde ocorrem as reações que se pretendem estudar. O interior do equipamento deve ser projetado de forma a suportar pressões elevadas, que no caso deste projeto corresponde a 200 bar, o que permite verificar a viabilidade de utilizar estas proteínas até uma profundidade máxima de 2 km. O reator deve também ser capaz de suportar temperaturas até 300 °C, que corresponde à temperatura atingida pelas plumas à saída de um *black smoker*. A este tipo de equipamentos, compostos por uma câmara pressurizada onde se pretende estudar a realização de um processo industrial, que tenha como requisitos pressões e temperaturas elevadas, dá-se o nome de autoclaves.[8]

Neste projeto, é ainda necessário garantir que a reação só se inicia quando atingidos os valores de pressão e temperatura desejados, pelo que deve ser criado um mecanismo que permita que a mistura dos reagentes apenas ocorra na altura pretendida. É também necessário recolher o produto da reação para que este possa ser analisado. No entanto, para o fazer é preciso retirar o produto do interior do reservatório e expô-lo novamente à pressão atmosférica e à temperatura ambiente. Se o tempo durante o qual a solução se encontra sujeita a estas condições for demasiado elevado, outras reações podem ocorrer inviabilizando os resultados dessa análise, sendo fundamental impedir que tal aconteça. Uma forma de o conseguir é congelando muito rapidamente o produto de reação em azoto líquido, pelo que o equipamento deverá contemplar ainda esta funcionalidade.

## 1.2. Objetivos

Este trabalho consiste no projeto de um equipamento autoclave que possibilite estudar de forma precisa o comportamento de proteínas, quando sujeitas a condições de elevada pressão e temperatura. A conceção deste equipamento foi motivada pela necessidade de realizar, num ambiente controlado, a prova de conceito sobre a possibilidade de utilizar ferritinas na extração de metais libertados por estas fontes hidrotermais existentes no fundo do oceano. Desta forma, foi definido que este equipamento teria de funcionar com uma pressão máxima de projeto,  $P_p = 20$  MPa, e uma temperatura máxima de projeto,  $T_p = 300$  °C.

O equipamento deverá ainda incluir um mecanismo que possibilite a mistura dos reagentes, apenas quando atingidas as condições pretendidas e um sistema responsável por congelar o produto da reação. O volume máximo dos reagentes é de 5 *ml* e o do produto de reação é 10 *ml*.

## 1.3. Revisão bibliográfica

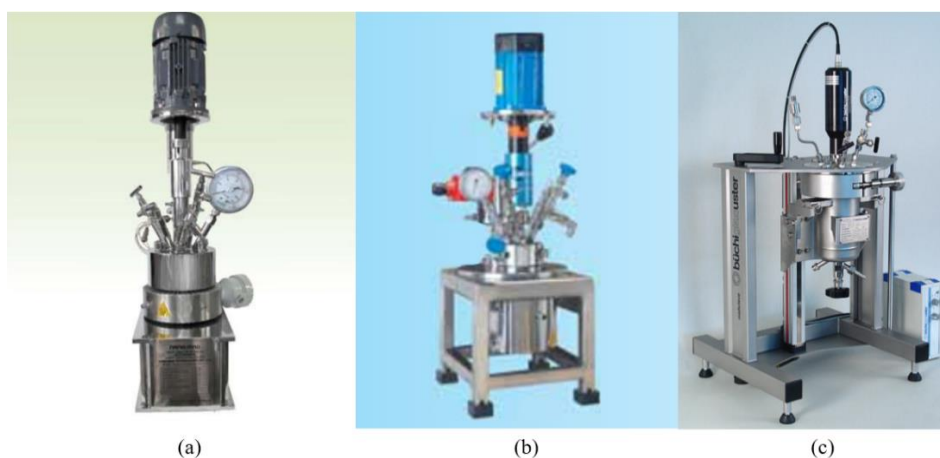
Para desenvolver este equipamento é conveniente, numa primeira fase, adquirir algum conhecimento relativo aos diferentes tipos de autoclaves que existem no mercado e compreender as suas diferentes aplicações. A partir dessa informação é possível conhecer qual a gama de pressões e de temperaturas a que funcionam, bem como identificar algumas características e funcionalidades que possam revelar-se interessantes para o projeto do equipamento a desenvolver neste trabalho. Na Tabela 1.1 encontram-se apresentadas as diversas aplicações, os parâmetros de funcionamento e as empresas que produzem e/ou comercializam os diferentes tipos de autoclaves.

*Tabela 1.1 - Apresentação de diversas empresas comerciantes de autoclaves, suas aplicações e gamas de funcionamento.*

Ref.	Tipo de Equipamento	Empresa	Aplicação	Pres. Max. (bar)	Temp. Max. (°C)
[9]	Reatores de alta pressão		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reações químicas envolvendo altas pressões e temperaturas</li> </ul>	690	650
[10]	Reatores de alta pressão		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estudar processos de hidrogenação, cristalização, catalisação e sintetização</li> </ul>	200	300
[11]	Hidrogenadores		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reações a altas pressões</li> <li>• Reações entre líquidos e gases</li> </ul>	350	600
[12]	Autoclaves verticais		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Esterilização</li> <li>• Pesquisa de laboratório</li> <li>• Trabalhos relacionados com a saúde</li> </ul>	0,6	138
[13]	Autoclaves verticais		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Esterilização</li> <li>• Equipamento de laboratório</li> </ul>	-	134
[14]	Autoclaves com produção de vapor		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Esterilização</li> <li>• Processamento de comida</li> <li>• Controlo de qualidade</li> <li>• Realização de testes destrutivos</li> </ul>	2,4	138

Todos os autoclaves apresentados na Tabela 1.1 são para utilização em laboratório. Estes podem ser divididos em dois grupos de acordo com as suas funcionalidades. O primeiro tipo de autoclave permite o estudo de diversas reações químicas em condições de funcionamento idênticas às pretendidas neste trabalho, revelando-se assim interessante para o projeto em apreço. Os equipamentos que fazem parte deste grupo revelam ainda um conjunto de características e elementos que poderão vir a ser integrados no projeto ao longo da sua conceção.

O segundo grupo de autoclaves é usado na esterilização de equipamentos médicos. Estes funcionam a temperaturas e pressões inferiores às pretendidas e a maioria utiliza vapor de água. Por isso, não são particularmente revelantes para este projeto.



*Figura 1.4 - Reatores de alta pressão, empresa: (a) Nano-mag; (b) AmAr; (c) Büchiglasuster.[9]–[11]*

De seguida, será feita uma breve descrição dos autoclaves do primeiro grupo, mais frequentemente denominados de reatores de alta pressão. A partir da análise dos catálogos dos diferentes equipamentos é possível concluir que a geometria cilíndrica é a mais aconselhável para o interior destes equipamentos, pois resiste melhor aos esforços internos aplicados. Os catálogos das empresas AmAr, Büchiglasuster e Nano-mag, relativos a reatores de alta pressão, são de grande interesse uma vez que apresentam equipamentos capazes de atingir as condições de pressão e temperatura desejadas neste trabalho (Figura 1.4). Todos estes equipamentos independentemente das suas dimensões, apresentam uma estrutura onde se encontra apoiado o reservatório cilíndrico, dentro do qual ocorrem as reações que se pretendem estudar. O volume interno onde ocorrem as reações é isolado do exterior e os instrumentos de admissão de fluido, bem como os instrumentos de medição e controlo, são colocados na tampa desse reservatório (Figura 1.5).



*Figura 1.5 - Reservatório cilíndrico e instrumentação no topo.[9]*

Estes catálogos apresentam ainda um conjunto de acessórios que poderão revelar-se úteis para o equipamento a ser projetado. A título de exemplo veja-se o acessório da Figura 1.6, que corresponde a uma válvula de amostragem que é incorporada no fundo do reservatório e que permite retirar o produto de reação do interior do autoclave de forma controlada.



*Figura 1.6 - Válvula de amostragem no fundo do reservatório.[10]*

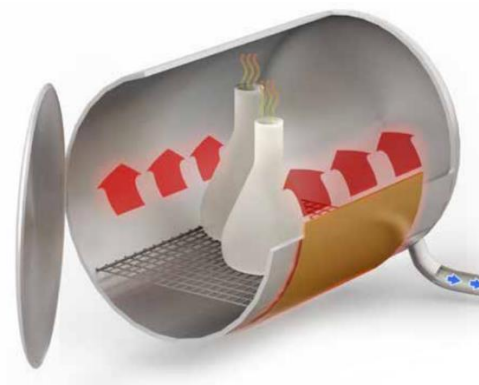
Embora os equipamentos do segundo grupo não apresentem as condições de funcionamento pretendidas, apresentam algumas características que poderão vir a ser adotadas no decorrer deste projeto.

O catálogo da empresa Labocon® inclui um conjunto de autoclaves com uma tampa no topo. Para garantir o isolamento do interior, a tampa é encerrada e trancada através de um sistema de rosca (Figura 1.7). O equipamento a projetar neste trabalho tem de apresentar uma abertura para o exterior para ser possível colocar os reagentes no seu interior e a utilização de um sistema de rosca para selar essa abertura pode ser uma solução interessante.



*Figura 1.7 - Autoclave com sistema de fecho de rosca.[12]*

Por fim, uma vez que se pretende variar a temperatura no volume interior, poder-se-á usar a solução apresentada num dos equipamentos do catálogo da empresa Tuttnauer® (Figura 1.8). Neste caso, faz-se passar uma corrente através de um material condutor que é colocada nas paredes do reservatório onde se dá a reação e, por efeito de Joule, o condutor aquece alterando a temperatura do meio em seu redor.



*Figura 1.8 - Câmara interior de autoclave aquecida através de um material condutor.[13]*

## **1.4. Estrutura da dissertação**

No capítulo 1 pretende-se apresentar as motivações que levaram à conceção deste equipamento e ainda, a pesquisa realizada sobre este tipo de equipamentos. Numa fase seguinte, no capítulo 2 é apresentada toda a metodologia que foi adotada ao longo do projeto do equipamento, finalizando com a sua montagem. Depois de concebido o reator, no capítulo 3 serão realizadas análises de elementos finitos com o objetivo de determinar o tempo de aquecimento do reator e verificar a sua capacidade de suportar os esforços que lhe são aplicados. No capítulo 4 será apresentado o correto processo de utilização do equipamento. Finalizando este trabalho no capítulo 5 com uma breve conclusão do trabalho realizado.





## Capítulo 2. Metodologia de projeto

Neste capítulo, pretende-se apresentar de forma detalhada toda a metodologia que foi adotada no decorrer deste projeto, as dificuldades encontradas e as diferentes soluções a que se chegou para executar cada uma das funcionalidades requeridas para este equipamento. Desta forma, no início do presente capítulo começa-se por expor os requisitos do projeto. De seguida será realizado um enquadramento do projeto, no qual se pretende dar a conhecer ao leitor as diferentes hipóteses equacionadas para responder a cada um dos requisitos. As opções tomadas ao longo do projeto serão também aqui justificadas.

Seguidamente serão apresentados os materiais utilizados neste trabalho e posteriormente será então apresentado todo o projeto de detalhe do equipamento. Aqui pretende-se dar a conhecer os diferentes elementos que o constituem, sendo apresentado de forma extensiva o seu dimensionamento e a sua funcionalidade.

Finalmente, será ainda descrita a correta montagem de todos os elementos do equipamento, dando-se especial destaque aos cuidados a ter com as ligações entre eles.

### 2.1. Requisitos de projeto

No capítulo anterior foram já apresentados os requisitos deste projeto e foi também explicitado o seu propósito. Na Tabela 2.1 apresentam-se esses requisitos de forma resumida.

*Tabela 2.1 - Requisitos de projeto*

Requisitos de projeto
1 – Controlar a admissão de pressão no interior do reator ( $P_p = 20$ MPa)
2 – Controlar a temperatura no interior do reator ( $T_p = 300$ °C)
3 – Iniciar a reação num determinado instante
4 – Volume máximo de reagente ( $V_r = 5$ ml)
5 – Volume máximo de produto de reação ( $V_s = 10$ ml)
6 – Congelar rapidamente o produto de reação

Ao longo do enquadramento do projeto, serão apresentados os diferentes componentes que permitem responder a cada um dos requisitos.

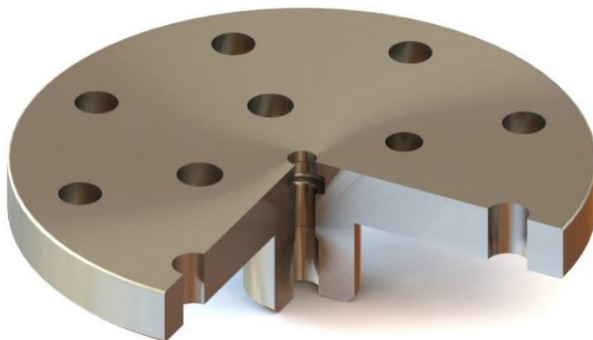
## 2.2. Anteprojeto

No Capítulo 1, mostrou-se que o equipamento que se pretende desenvolver neste projeto consiste num reator de alta pressão. Este tipo de equipamento é normalmente composto por um reservatório cilíndrico dentro do qual se pretende realizar determinadas reações. O reservatório é um dos componentes principais deste projeto Figura 2.1, uma vez que terá de ser dimensionado por forma a suportar as pressões impostas no seu interior e um aumento de temperatura até 300 °C. Como os reagentes irão estar em contacto direto com as paredes do reservatório, a seleção do material deste elemento deve ser feita de modo a evitar que ocorram reações indesejadas entre este e a solução.



*Figura 2.1 - Reservatório.*

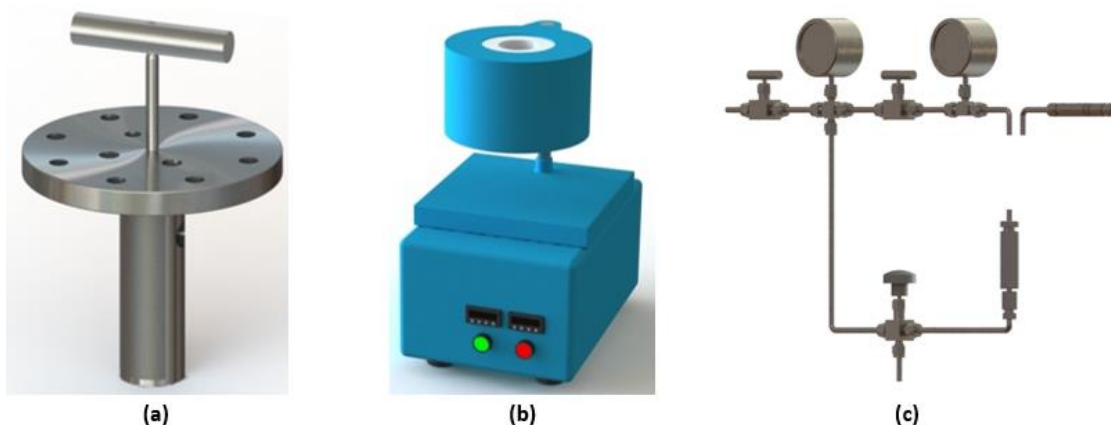
Um outro componente igualmente importante, devido á sua complexidade, é a tampa do reservatório (Figura 2.2). Como foi anteriormente referido no subcapítulo 1.3, é conveniente ligar todos os sistemas de controlo da reação neste elemento. Isto implica que a geometria da sua zona central será em grande parte influenciada por esses sistemas.



*Figura 2.2 - Tampa do reator.*

Será também necessário estabelecer uma ligação não permanente entre a tampa e o reservatório, de forma a se colocar os reagentes no interior do reator. Esta ligação tem de suportar os esforços que lhe são aplicados, por intermédio da ação da pressão na tampa do reservatório. Para garantir a estanquicidade desta ligação, deverá também ser concebida uma zona para montagem de um elemento de selagem.

As dimensões gerais do reservatório e da tampa estarão condicionadas por diversos fatores. Em primeiro lugar é necessário conceber espaço na tampa para ligar todos os elementos de controlo: Sistema de controlo do início da reação; o Sistema de controlo de temperatura; e o Sistema de controlo de pressão (Figura 2.3). Em segundo lugar, há componentes destes sistemas de controlo que, devido à sua geometria, irão condicionar a forma e as dimensões destes dois elementos. Como já foi mencionado, o produto de reação tem de ser extraído do interior do reservatório de forma rápida para que a solução possa ser congelada. Assim, o reservatório terá ainda de contemplar uma abertura na parte inferior por onde o fluido possa passar. Essa extração terá de ser controlada por algum tipo de válvula para que o resultado da reação seja coletado na altura pretendida.



*Figura 2.3 - Sistemas de controlo do equipamento; (a) Sistema de controlo do início da reação; (b) Sistema de controlo de temperatura; (c) Sistema de controlo de pressão.*

Dada a importância de cada um dos sistemas anteriormente referidos para o funcionamento deste equipamento e ainda, o impacto que cada um deles tem na geometria final do reator, decidiu-se iniciar este projeto com o seu desenvolvimento. Começou-se pela conceção do Sistema de controlo do início da reação. Chegou-se à conclusão que a melhor forma de controlar, a partir do exterior, o início da reação, passaria por introduzir um dos reagentes no fundo do reservatório e o outro num copo de geometria cilíndrica Figura 2.4. Este copo deverá ser montado na zona central da tampa do reservatório, a sua geometria permite que a ligação à tampa seja obtida através de uma rosca existente no topo do mesmo (Figura 2.7).



*Figura 2.4 - Copo do reagente*

Para que seja possível derramar um dos reagentes sobre o outro, é necessário criar uma abertura no fundo do copo. Essa abertura estará obstruída por um elemento até ao instante em que se pretenda que ocorra a mistura. Inicialmente, equacionou-se a hipótese de utilizar uma válvula solenoide de pequenas dimensões para executar esta função (Figura 2.5). Este tipo de válvula é controlado através de um impulso elétrico, pelo que seria necessário estabelecer uma ligação elétrica entre a válvula e o exterior do reator de modo a permitir o seu controlo.



*Figura 2.5 - Válvula solenoide.[15]*

No entanto, esta hipótese foi abandonada uma vez as dimensões deste tipo de válvula e a gama de temperaturas a que funcionam não são compatíveis com os requisitos do projeto. Devido a estes fatores, tomou-se a opção de conceber um elemento mecânico para executar esta função. Foi então desenvolvido um outro componente a que se deu o nome de válvula de depósito (Figura 2.6).



*Figura 2.6 - Válvula de depósito*

Esta válvula consiste num corpo cilíndrico longo que apresenta numa das suas extremidades um disco capaz de obstruir a abertura no fundo do copo. A outra extremidade passa através da tampa para o exterior do reservatório. O controlo e a fixação desta válvula são realizados através de um par roscado que fixa a válvula à tampa do reservatório. A rosca existente numa parte do comprimento da válvula permite que o operador defina a sua posição vertical no interior do reator, sendo assim possível controlar o momento em que acontece a mistura dos reagentes. A zona da tampa por onde passa esta válvula deve ser concebida de forma a não comprometer a selagem do reservatório durante a reação (Figura 2.7).



*Figura 2.7- Ligação do sistema de controlo do início de reação.*

O Sistema de controlo da temperatura deve compreender as seguintes funções: aquecer os reagentes no interior do reservatório até à temperatura definida em cada experiência; medir a temperatura a que se encontram os reagentes a cada instante; garantir que essas temperaturas coincidem durante o decorrer da experiência.

Primeiramente, escolheu-se medir a temperatura dos reagentes usando um termopar (Figura 2.8). Este género de sensores de temperatura são constituídos por dois metais diferentes ligados numa extremidade. Quando essa extremidade se encontra a uma temperatura diferente da extremidade livre, é gerada uma diferença de potencial que é facilmente registada através de um voltímetro. O valor medido tem uma correlação conhecida com a temperatura permitindo assim obter o valor da temperatura.



*Figura 2.8 - Exemplo de diferentes tipos de termopares.[16]*

Para aumentar a temperatura no interior do reservatório equacionou-se inicialmente a hipótese de utilizar uma resistência elétrica. Esta teria de ser introduzida na tampa do reservatório através de uma ligação roscada (Figura 2.9). Seria também necessário conceber um circuito elétrico para controlar a corrente na resistência de forma a garantir os valores de temperatura pretendidos em todas as fases da experiência. No entanto, esta opção foi descartada porque as dimensões destas resistências não se enquadram com as dimensões inerentes a este projeto.



*Figura 2.9 - Exemplos de resistências com hipótese de ligação roscada.[17]*

Mais tarde, surgiu a possibilidade de colaboração com outro laboratório, com instalações no Campus Tecnológico e Nuclear do Instituto Superior Técnico de Lisboa, onde existe um forno elétrico vertical que tem como função o aquecimento do interior deste tipo de reatores. Este forno tem incorporado um controlador de temperatura e um cabo de ligação a um termopar. Desta forma, é passível controlar a temperatura no interior do reator de forma autónoma. Este deve ser introduzido numa abertura existente no centro do forno, essa abertura tem uma forma cilíndrica com 55 mm de diâmetro e 120 mm de altura. Dada esta alteração, as dimensões gerais do reservatório ficam condicionadas pelo espaço existente no interior do forno.

Por último, falta referir o Sistema de controlo de pressão. Este, foi inicialmente concebido de forma a fornecer a pressão pretendida no interior do reservatório; permitir a leitura precisa do valor da pressão dentro do reservatório; possibilitar o controlo da pressão; ativar um sistema de segurança no caso da pressão no interior do reservatório ultrapasse um valor previamente definido. Posteriormente, como vai de seguida ser explicado, foi também necessário incorporar neste sistema a função de extração do produto da reação.

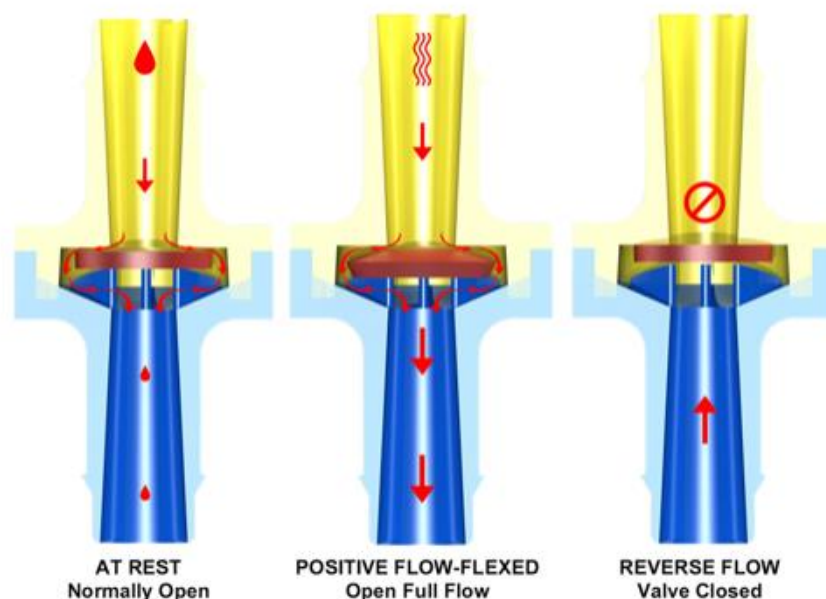
No início deste projeto foi estabelecido que a alimentação de pressão no interior do reator seria realizada através da sua ligação com uma garrafa de hélio comprimido. A razão pela qual se definiu uma pressão máxima neste projeto de 20 MPa, prende-se com o facto de habitualmente estas garrafas serem comercializadas a uma pressão de 200 bar. Sendo o hélio um gás inerte a sua utilização não causa qualquer tipo de interferência com as reações que se pretendem estudar.

Por razões de segurança deve ser introduzida um manómetro de regulação no bocal desta garrafa. Este permite controlar a saída de gás do interior da garrafa, fornecendo uma leitura da pressão no seu interior e outra à saída. Tal como o forno, é possível ter acesso a este componente no laboratório anteriormente mencionado, onde são ainda garantidas todas as condições de segurança necessárias para a utilização deste equipamento.

Para introduzir no interior do reservatório o gás proveniente da garrafa é necessário um conjunto de componentes para que o processo seja devidamente controlado e seguro. Em primeiro lugar, para estabelecer a ligação física entre a garrafa e o reservatório são necessários tubos capazes de suportar a pressão pretendida. Para que seja possível ao operador deste equipamento controlar a pressão no interior do reservatório e no circuito por onde o fluido irá passar, é necessário acrescentar um conjunto de componentes como válvulas, manómetros e ainda, uniões que permitam a montagem dos diversos componentes deste sistema. Por razões de segurança é necessário introduzir na tampa uma válvula de escape, cuja função é garantir que as pressões no interior do reservatório não ultrapassem um valor máximo previamente estabelecido.

Para extrair o produto da reação do interior do reservatório, optou-se por montar uma válvula no fundo do reservatório. Esta montagem permite que a solução possa ser expelida de uma forma rápida do interior do reator para um outro reservatório se encontra mergulhado em azoto líquido. Como o reator estará dentro do forno elétrico, a escolha do tipo de válvula para introduzir no fundo do reservatório tem que ter em conta os seguintes constrangimentos. A distribuição de temperatura no interior do forno não é uniforme, sendo esta mais elevada na sua zona central. É no fundo do reservatório do reator que se dá a reação, pelo que esta zona deve coincidir com o centro do forno. A válvula deve estar colocada o mais próximo possível do reator para minimizar o volume de reagente acumulado entre a válvula e o fundo do reservatório no decorrer de cada experiência. Desta forma, chegou-se à conclusão de que a válvula mais adequada para esta aplicação será uma válvula de retenção (Figura 2.10). Esta válvula apresenta dimensões mais reduzidas que as restantes opções, porque o seu estado (aberta ou fechada) depende da diferença de pressão entre as suas extremidades, eliminando assim a necessidade de uma manivela.





*Figura 2.10 - Funcionamento de uma válvula de retenção.*

Uma vez que o controlo deste tipo de válvulas é realizado a partir da diferença de pressão gerada entre as extremidades, o seu funcionamento implica que o escoamento de fluido no seu interior possa ocorrer apenas num sentido. Desta forma, esta válvula encontra-se fechada quando a pressão na saída é igual ou superior à pressão na entrada e passa a estar aberta quando essa condição deixa de se verificar (Figura 2.10). Para tornar possível a utilização de uma válvula deste tipo neste projeto, foi necessário realizar algumas alterações no circuito de pressão do equipamento. Sendo necessário aplicar uma pressão superior à existente no interior do reator, à saída da válvula. Foi adicionado a este sistema um circuito secundário de pressão, para controlar o estado da válvula. Neste circuito terá de se acrescentar os mesmos elementos de controlo, que no circuito original.

Todos os elementos previamente mencionados têm de contemplar ainda um tipo de ligação entre eles e também com os tubos, de forma a garantir a estanquicidade do circuito de gás. Com o objetivo de facilitar a montagem deste circuito e a sua manutenção, para este projeto foram utilizadas conexões do tipo *Swagelok Medium-Pressure Tube Fittings – FK Series*, de acordo com a terminologia apresentada pela empresa SWAGELOK® (Figura 2.11). Este tipo de ligação facilita a montagem dos componentes, porque cada um deles pode ser previamente colocado na posição de trabalho desejada e de seguida, a partir de um aperto específico de uma rosca, a ligação pode ser estabelecida ao tubo. Este aperto irá indentar a coroa existente na parte interior desta ligação, na parede exterior do tubo garantindo desta forma a estanquidade da ligação. No decorrer do processo de manutenção, quando a ligação for desapertada, a rosca fêmea passa a estar integrada no tubo, permitindo que a ligação possa ser posteriormente aproveitada.

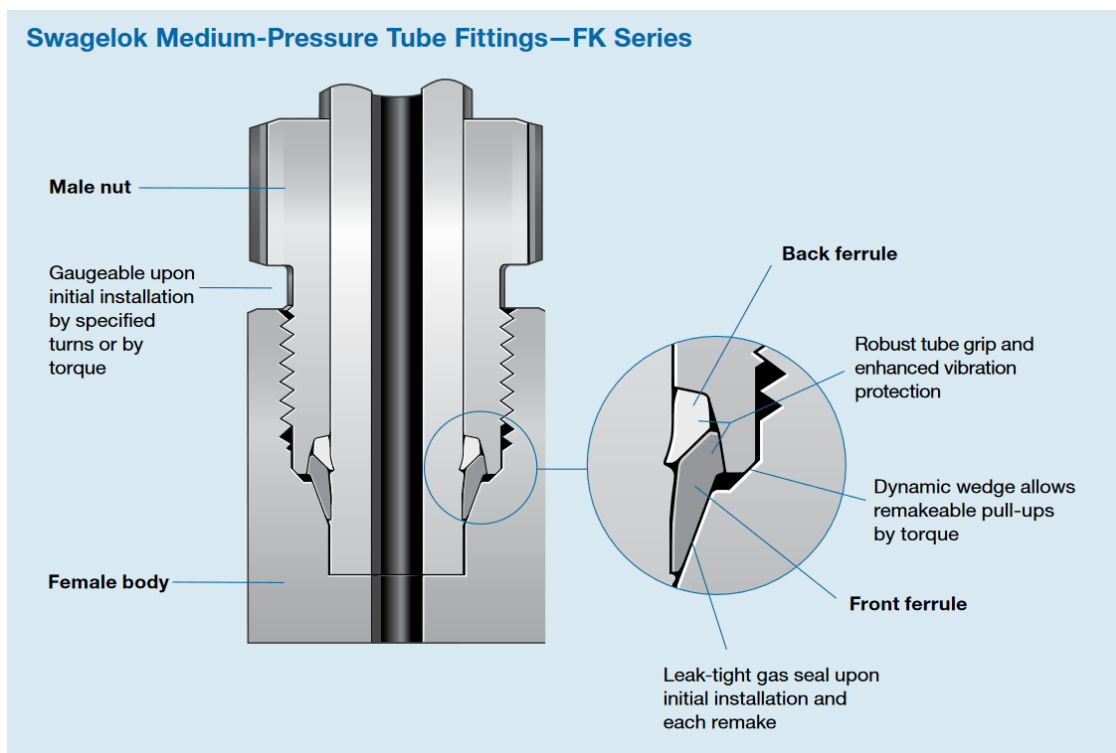


Figura 2.11 - Conexão do tipo Swagelok Medium-Pressure Tube Fittigs – FK Series.[18]

## 2.3. Materiais utilizados

Todos os componentes concebidos neste projeto, bem como todos os restantes elementos por onde ocorra a passagem de fluido, serão fabricados a partir de aço inoxidável 316, com a seguinte composição química de acordo com a norma DIN (X 5 CrNiMo 17 12 2):

Tabela 2.2 - Composição química aço Inox 316.[19]

Elemento	Min (%)	Max (%)
<b>C</b>	-	0.07
<b>Si</b>	-	1.00
<b>Mn</b>	-	2.00
<b>Cr</b>	16.50	18.50
<b>Mo</b>	2.00	2.50
<b>Ni</b>	10.00	13.00

Este material é comercializado em varões de perfil circular, com um diâmetro de secção que pode variar entre 6 e 120 mm. As suas propriedades físicas e mecânicas encontram-se apresentadas na Tabela 2.3.[19]

*Tabela 2.3 - Propriedades Aço Inox 316 (valores para  $T=300^{\circ}\text{C}$ ). [19]*

Propriedades Físicas	Valor	Unidade
<b>Densidade</b>	8.00	$\text{g/cm}^3$
<b>Coefficiente de Dilatação Térmica</b>	17.00	$10^{-6} \text{ m/mK}$
<b>Condutibilidade Térmica</b>	15.00	$\text{W/mK}$
<b>Módulo de Elasticidade</b>	200	$\text{GPa}$
Propriedades Mecânicas	Valor	Unidade
<b>Tensão de Cedência (<math>\sigma_C</math>)</b>	200	$\text{MPa}$
<b>Tensão de Ruptura (<math>\sigma_R</math>)</b>	500	$\text{MPa}$

Ao longo deste projeto irão ser realizadas algumas aproximações, para determinar certos parâmetros dos diversos componentes. Tendo isso em conta foi definido um coeficiente de segurança,  $n = 2$ , como forma de contabilizar os erros produzidos por tais aproximações. Desta forma, ao longo do documento irá ser considerada uma tensão máxima admissível:

$$\sigma_{ADM} = \frac{\sigma_C}{n} = 100 \text{ MPa} \quad (2.1)$$

## 2.4. Projeto de detalhe

De seguida, será apresentado de forma pormenorizada todo o pensamento adotado ao longo do projeto de detalhe deste equipamento. Começaremos por abordar cada um dos sistemas de controlo da reação, nomeadamente a conceção do Sistema de controlo do início da reação. Este sistema ocupa toda a zona central do equipamento pelo que terá uma grande influência na dimensão e posicionamento dos restantes componentes. Posteriormente, serão apresentados os sistemas de controlo de temperatura e de pressão. Estes sistemas vão condicionar não só a geometria do reservatório, mas também da sua tampa. Após a definição dos três sistemas, apresentar-se-á a geometria final do reservatório, da tampa e da solução encontrada para ligar estes dois elementos de forma estanque e não permanente.

### 2.4.1. Sistema de controlo do início de reação

Este sistema é composto por dois elementos fundamentais a válvula de depósito e copo do reagente (Figura 2.12) Estes dois elementos permitem armazenar, enquanto desejado, um dos reagentes numa zona separada no interior do reator. Estes dois componentes são ligados à tampa do reservatório através de uma ligação roscada. Para garantir a estanquicidade do equipamento e uma vez que o corpo da válvula deverá passar para o exterior do equipamento, é necessário inserir uma junta circular entre o corpo da válvula e a tampa do reservatório, numa zona posterior à ligação entre estes dois elementos.

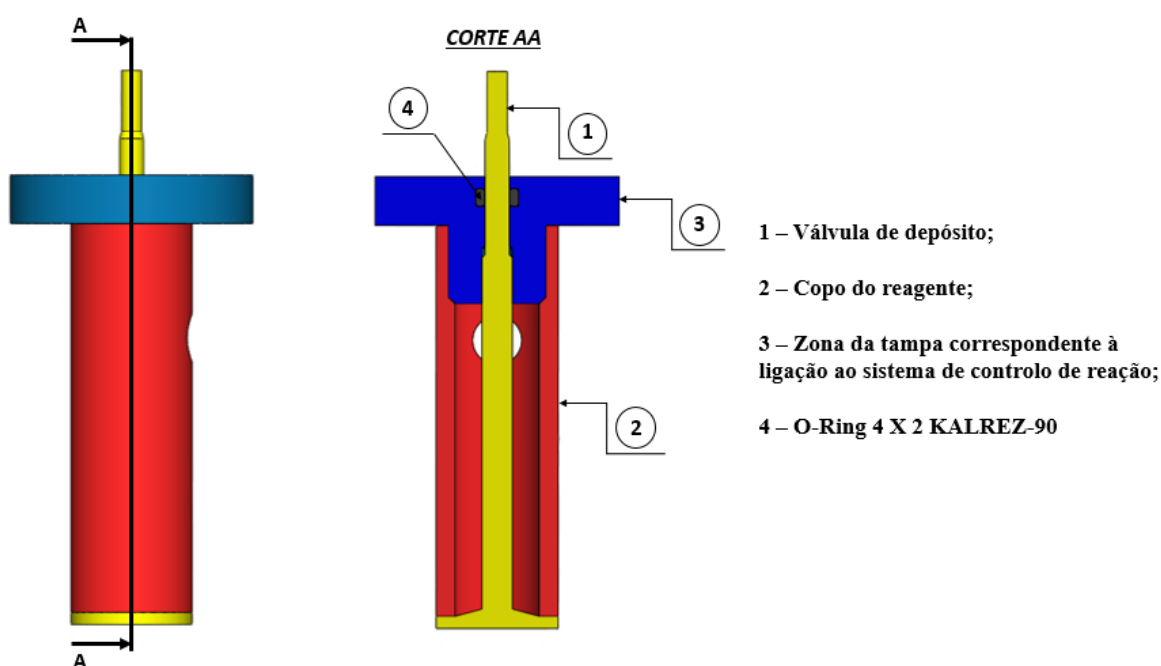


Figura 2.12 - Elementos do Sistema de controlo do início da reação.

A válvula de depósito consiste num corpo cilíndrico alongado composto por três zonas diferentes. Numa das suas extremidades apresenta um disco capaz de obstruir o fundo do copo do reagente. Este disco encontra-se ligado ao corpo da válvula, que consiste num cilindro com 5 mm de diâmetro. Na extremidade oposta do corpo da válvula, existe uma rosca que permitirá não só fixar a válvula à tampa do reservatório, mas também controlar a sua posição. A zona da válvula que se segue a esta rosca apresenta um diâmetro inferior ao do corpo da válvula e as suas dimensões depende do elemento de selagem.

Inicialmente foi estabelecido que o diâmetro da rosca da válvula seria equivalente ao diâmetro de secção do corpo da válvula ( $d_v = 5$  mm), pelo que foi seleccionada uma rosca métrica M5 para esta ligação. As suas dimensões encontram-se apresentadas na Tabela 2.4.[20]

Tabela 2.4 - Dimensões nominais rosca M5.[20]

Rosca M5	
<b>Passo</b>	$p = 0.8 \text{ mm}$
<b>Diâmetro nominal</b>	$d = 5.000 \text{ mm}$
<b>Diâmetro médio</b>	$d_m = 4.480 \text{ mm}$
<b>Diâmetro interior</b>	$d_i = 4.134 \text{ mm}$

Uma vez que a parte desta válvula que se encontra no interior do reator está sujeita à pressão de projeto,  $P_p = 20 \text{ MPa}$ , e a restante parte está sujeita à pressão atmosférica,  $P_{atm} \approx 0.1 \text{ MPa}$ , irá existir uma força provocada por essa diferença de pressão que será transmitida através do corpo da válvula até à zona onde esta se encontra fixa à tampa. Essa será então, a força a que a rosca de ligação da válvula à tampa irá estar sujeita.

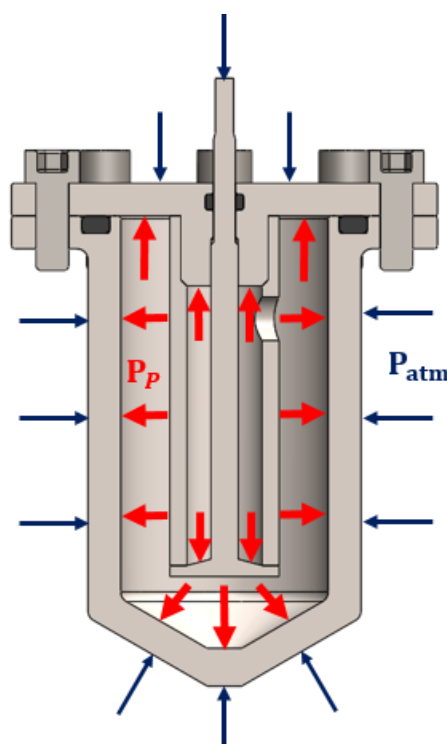


Figura 2.13 Demonstração das zonas do reator sujeitas à pressão de projeto e a pressão ambiente.

A pressão corresponde à força que é aplicada ao longo de uma determinada área, pelo que é possível ficar a conhecer a força resultante da ação da pressão na válvula,  $F_v$ , a partir da seguinte expressão:

$$F_v = A_v P_p \Leftrightarrow F_v = \frac{\pi}{4} d_v^2 P_p \quad (2.2)$$

Onde  $A_v$  e  $d_v$  correspondem respectivamente à área de secção do corpo da válvula e o seu diâmetro. Resolvendo a equação (2.2) obteve-se uma força  $F_v = 393$  N, que corresponde à força a que a rosca, com dimensões equivalentes às apresentadas na Tabela 2.4, irá estar sujeita. Como é sugerido na literatura [21], para verificar se a ligação é capaz de suportar os esforços que lhe são aplicados, é necessário comparar a força a que esta está sujeita, com a força máxima admissível considerando cada um dos três modos de falha característicos de uma ligação roscada:

1. Tensão normal no fuso macho
2. Tensões de corte nos filetes dos fusos macho e fêmea
3. Pressão média nos flancos dos fusos macho e fêmea

As expressões que permitem calcular a força máxima admissível para cada modo de falha são as seguintes:[21]

$$F_{1\text{ máx.m}} = \frac{\pi}{4} \left( \frac{d_m + d_i}{2} \right)^2 \sigma_{ADM.m} \quad (2.3)$$

$$F_{2\text{ máx.m}} = \frac{7\pi}{20} dH \sigma_{ADM.m} \quad (2.4)$$

$$F_{2\text{ máx.f}} = \frac{7\pi}{16} dH \sigma_{ADM.f} \quad (2.5)$$

$$F_{3\text{ máx.mf}} = \frac{9\pi H}{100p} d^2 P_{ADM.mf} \quad (2.6)$$

Onde por exemplo, a força  $F_{1\text{ máx.m}}$  corresponde à força máxima admissível na rosca do elemento macho considerando o primeiro modo de falha. Tanto a válvula como a tampa do reservatório serão fabricadas em aço inox 316, pelo que foi considerada a tensão admissível calculada a partir da equação (2.1). Para ser possível calcular as forças máximas falta ainda definir a altura do par roscado. Para esta aplicação foi escolhida uma rosca de perfil alto, pelo que a altura  $H$ , que corresponde ao comprimento mínimo necessário para garantir a ligação entre a válvula e a tampa, é dada por: [21]

$$H = d = 5 \text{ mm} \quad (2.7)$$

A este comprimento devem ser adicionados 3 mm, que correspondem ao comprimento de atuação da válvula. Para além deste aumento do comprimento roscado nos dois elementos, é ainda necessário adicionar mais 2 mm na rosca macho e 1 mm na rosca fêmea. Deste modo, é possível garantir que a atuação da válvula é interrompida quando esta se encontra comprimida contra o fundo do copo e não, por atingir o fim de cada uma dessas roscas. No entanto, para o cálculo das equações (2.3) a (2.6), deve ser considerado o mínimo comprimento roscado, o que resultou nos seguintes valores de força máxima:

$$F_{1\text{ máx.m}} = 1.508 \text{ KN}$$

$$F_{2\text{ máx.m}} = 2.845 \text{ KN}$$

$$F_{2\text{ máx.f}} = 3.556 \text{ KN}$$

$$F_{3\text{ máx.mf}} = 4.572 \text{ KN}$$

Uma vez obtidas as dimensões da rosca da válvula e a força a que esta vai estar sujeita, é possível calcular os momentos de aperto,  $T_a$ , e desaperto,  $T_d$ , característicos deste par roscado. Nesta aplicação, esses momentos correspondem ao esforço necessário para abrir e fechar da válvula respetivamente. A partir da literatura foram também obtidas as seguintes expressões para o cálculo de cada um dos momentos anteriormente referidos.[21]

$$T_a = F \frac{d_m(\pi\mu d_m \sec \alpha + l)}{2(\pi d_m \sec \alpha - \mu l)} \quad (2.8)$$

$$T_d = F \frac{d_m(\pi\mu d_m \sec \alpha - l)}{2(\pi d_m \sec \alpha + \mu l)} \quad (2.9)$$

Como foi anteriormente calculado a válvula irá estar sujeita a uma força  $F_v = 393$  N. Neste projeto foi considerado um coeficiente de atrito aço – aço,  $\mu = 0.15$ , para o realizar este cálculo tem de se considerar ainda as características do parafuso. A rosca desta válvula é rosca M5 pelo que o seu ângulo de rosca é  $2\alpha = 60^\circ$  e o seu passo aparente,  $l$  (0.8 mm Tabela 2.4), pode ser obtido multiplicando o passo característico da rosca,  $p$ , pelo número de entradas que esta apresenta. Neste trabalho será utilizada uma rosca com apenas uma entrada pelo que o passo aparente é equivalente ao passo característico. Desta forma obtiveram-se os seguintes valores para os momentos:

$$T_a = 177 \times 10^{-3} \text{ Nm}$$

$$T_d = 88 \times 10^{-3} \text{ Nm}$$

Para garantir que a passagem da válvula pelo interior da tampa não compromete a estanquidade do reator, é necessário abrir, nessa zona de passagem, um rasgo de forma a aí introduzir um O-Ring. Esse rasgo estará localizado a 2 mm do topo da tampa do reservatório por forma a possibilitar a introdução do elemento de selagem sem comprometer a resistência dessa zona. Para saber as dimensões desse rasgo foram seguidas as indicações apresentadas nos catálogos da empresa EPIDOR®.[22]

A escolha do O-Ring depende das dimensões características de cada aplicação e das condições a que este vai estar sujeito. Este componente é normalmente definido por: diâmetro interior,  $d_1$ ; diâmetro de secção,  $d_2$ ; material de que é feito; pela sua dureza. O diâmetro exterior do O-Ring,  $d_3$ , pode ser obtido por aplicação da seguinte equação:

$$d_3 = d_1 + 2d_2 \quad (2.10)$$

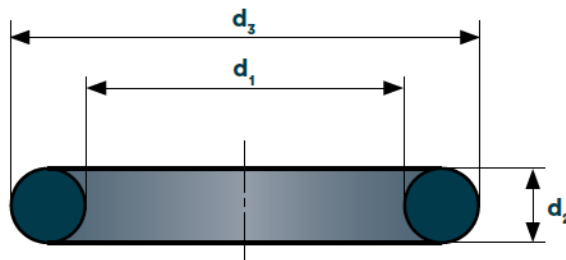


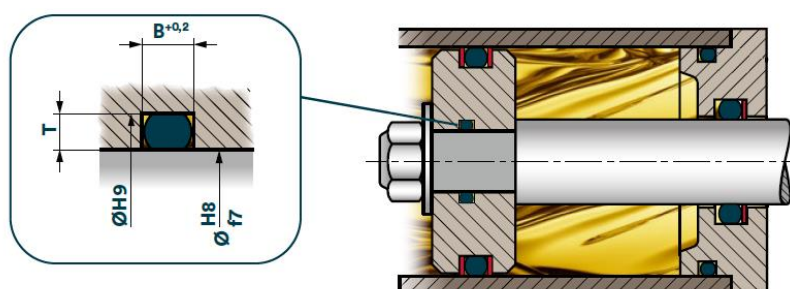
Figura 2.14 - Dimensões características de um O-Ring.[22]

Como foi anteriormente referido a zona da válvula posterior à rosca, que corresponde à zona onde irá ser introduzido este elemento, deverá apresentar um diâmetro inferior ao corpo da válvula. Pelo que, foi estabelecido que o diâmetro de secção dessa zona seria de 4 mm, o que corresponde ao diâmetro interior do O-Ring. Para pressões de funcionamento superiores a 160 bar o nível de dureza aconselhado para estes elementos é de 90 Sh e para temperaturas na ordem dos 300 °C o material recomendado deve ser um Perfluoroelastómetro. Por isso, dos catálogos da empresa MONROE SEALS® selecionou-se um O-Ring com as especificações, apresentadas na Tabela 2.5.[23]

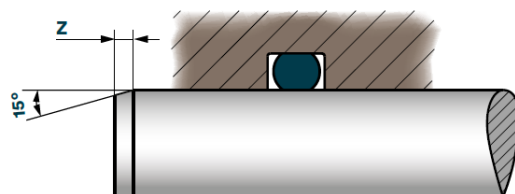
*Tabela 2.5 - Especificações O-Ring de selagem do sistema de controlo do início da reação.[23]*

Material	d <sub>1</sub> (mm)	d <sub>2</sub> (mm)	Referência
KALREZ®	4	2	4 X 2 KALREZ-90

A partir da consulta dos catálogos fornecidos pela empresa EPIDOR®, chegou-se às dimensões apresentadas na Tabela 2.6 para o rasgo de introdução do O-Ring, estas dependem do seu diâmetro d<sub>2</sub> e do tipo de montagem. Neste caso trata-se de uma montagem quási-estática no exterior de um veio como é visível no pormenor da Figura 2.15.[22]



*Figura 2.15 - Montagem estática de um O-Ring no exterior de um veio e respetivas tolerâncias.[22]*



*Figura 2.16 - Dimensões do chanfro do veio para facilitar a introdução do O-Ring.[22]*

De modo a facilitar a passagem da válvula no interior do O-Ring, é aconselhado criar um chanfro na zona da válvula por onde este elemento deve ser introduzido. A altura do chanfro representada na Figura 2.16 pela letra Z, também depende do diâmetro d<sub>2</sub> e o seu valor pode ser consultado na Tabela 2.6.



Tabela 2.6 - Dimensões relativas à introdução do O-Ring no sistema de controlo de início da reação.[22]

$d_2$ (mm)	T (mm)	B (mm)	Z (mm)
2.00	1.50	2.86	1.20

Finalmente, são ainda sugeridos os seguintes acabamentos superficiais, apresentados na Tabela 2.7 para as diferentes partes dos componentes que irão estar em contacto com o O-Ring.

Tabela 2.7 - Acabamentos superficiais sugeridos para a montagem de O-Rings

Faces Consideradas	Acabamento Sugerido
<b>Paredes / fundo</b>	1.0 – 2.5 $\mu\text{m}$
<b>Paredes do cilindro / superfícies de contacto</b>	0.2 – 0.6 $\mu\text{m}$

A partir da tabela 13.1 da literatura, foram seleccionados acabamentos superficiais de 1.6  $\mu\text{m}$  e 0.4  $\mu\text{m}$ , respetivamente para as paredes e fundo do rasgo do O-Ring e para as superfícies em contacto com este.[20]

Como foi anteriormente referido, a válvula apresenta numa das suas extremidades um disco cuja função é obstruir o fundo do copo do reagente. Pelo que, as dimensões desse disco dependem das dimensões do copo nessa zona. O copo, por sua vez, está ligado a tampa do reservatório através de uma rosca.

Neste projeto foi definido que a rosca do copo seria uma rosca fêmea, a fim de otimizar o espaço no interior do reator. Desta forma, o diâmetro interior do copo,  $d_{ic}$ , é equivalente ao diâmetro interior da sua rosca. Como no centro da tampa já existe uma rosca M5 para a fixação da válvula de depósito, para manter a rigidez deste componente terá que existir uma espessura de afastamento dessa rosca de 2 mm. O valor mínimo que o diâmetro interior do copo pode tomar é:

$$d_{ic} > 5 + 2 \times 2 \Leftrightarrow d_{ic \min} = 9 \text{ mm} \quad (2.11)$$

A partir da consulta da Tabela 15.10 da literatura [20], que apresenta as dimensões nominais das roscas ISO, chegou-se à conclusão que a primeira rosca que verifica a condição em cima referida seria uma rosca M12. No entanto a utilização de uma rosca com essas dimensões implicaria que posteriormente fosse obtida, de acordo com a equação (2.14) que será mais à frente apresentada, uma altura do copo do reagente superior à desejada para o correto funcionamento do equipamento. Desta forma foi seleccionada uma rosca M16, que já garante uma altura mais próxima do desejado, as suas dimensões nominais podem ser observadas na Tabela 2.8.

*Tabela 2.8 - Dimensões nominais rosca M16. [20]*

Rosca M16	
Passo	$p = 2.0 \text{ mm}$
Diâmetro nominal	$d = 16.000 \text{ mm}$
Diâmetro médio	$d_m = 14.701 \text{ mm}$
Diâmetro interior	$d_i = 13.835 \text{ mm}$

Como é possível observar na Figura 2.13, o copo do reagente não vai estar sujeito a esforços devido à pressão, pelo que esta ligação tem apenas de fixar o copo do reagente à tampa do reservatório. Como esta ligação não irá estar sujeita a esforços significativos, não é necessário fazer uma análise idêntica à realizada para a tampa do reator. Para definir por completo esta rosca falta ainda indicar o seu comprimento roscado. Optou-se por uma rosca de perfil médio, pelo que:

$$H = 0.8 \times d = 12.8 \text{ mm} \quad (2.12)$$

Nesta fase, a zona central da tampa do reator, que corresponde à zona onde irá fixar este sistema, já se encontra totalmente definida. As suas dimensões dependem exclusivamente das duas ligações anteriormente dimensionadas e da junta circular também anteriormente apresentada. Na Figura 2.17 é possível observar a geometria correspondente a essa zona. Sendo que desta falta apenas definir a dimensão relativa à espessura da tampa, que será posteriormente apresentada no subcapítulo 2.4.5.

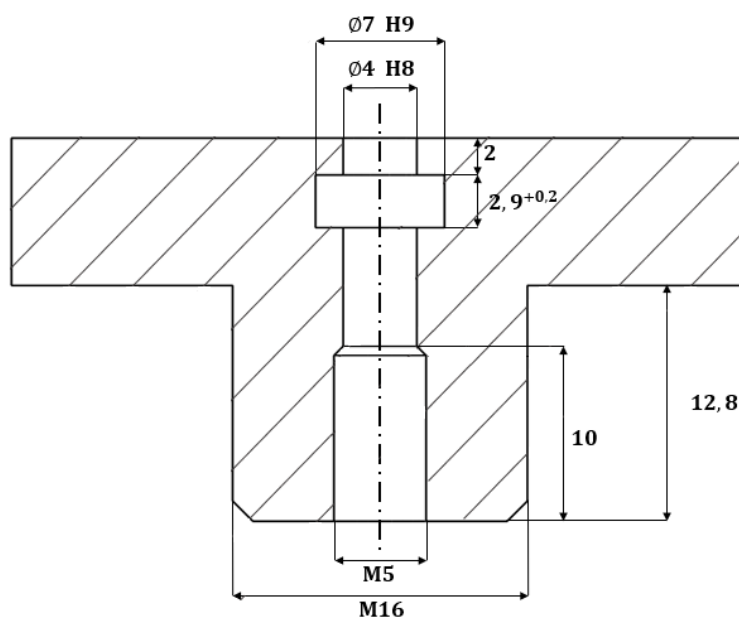


Figura 2.17 - Geometria da zona da tampa correspondente a ligação com o sistema de início da reação.

Uma vez escolhida a rosca de fixação do copo do reagente à tampa, é então possível definir as dimensões do copo do reagente. Tendo sido selecionada uma rosca M16, o diâmetro interior do copo do reagente será  $d_{ic} = 13.8$  mm, que corresponde ao diâmetro interior da rosca. A espessura do copo terá que ser equivalente ao diâmetro nominal da rosca do copo mais 2 mm, para garantir a rigidez do elemento. Desta forma, obteve-se um diâmetro exterior do copo,  $d_c = 20$  mm (Figura 2.19).

A altura do copo do reagente e, conseqüentemente, altura da válvula de depósito, dependem de altura mínima,  $h_r$ , que o copo terá de apresentar de modo que o volume no seu interior seja equivalente ao volume de reagente apresentado na Tabela 2.1, é este:

$$V_r = 5 \text{ ml} = 5 \times 10^3 \text{ mm}^3$$

O interior do copo é em parte ocupado pelo corpo da válvula, como é visível na Figura 2.18. Pelo que, o volume disponível nessa zona é dado pela seguinte expressão:

$$V_r = \frac{\pi}{4} (d_{ic}^2 - d_v^2) h_r \quad (2.13)$$

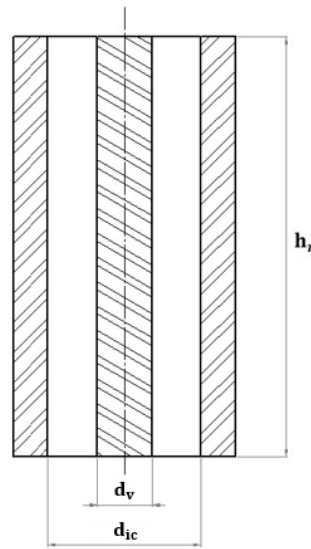
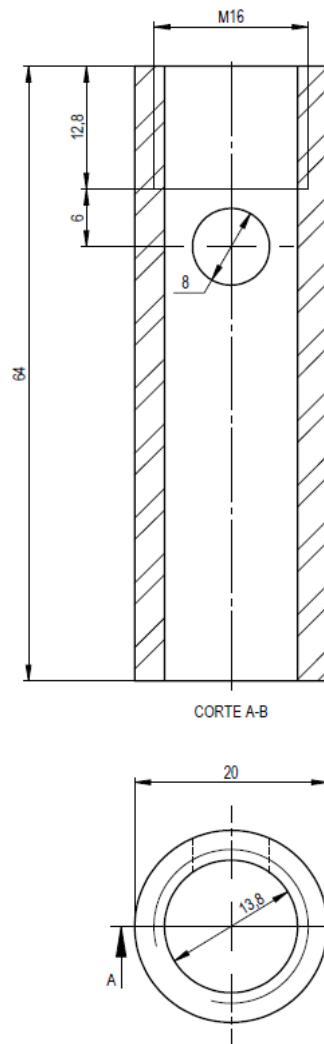


Figura 2.18 - Dimensões relevantes para o cálculo da altura do reagente no interior do copo

Resolvendo a equação (2.13) em ordem à altura  $h_r$  e considerando o volume de reagente referido, obtém-se uma altura:

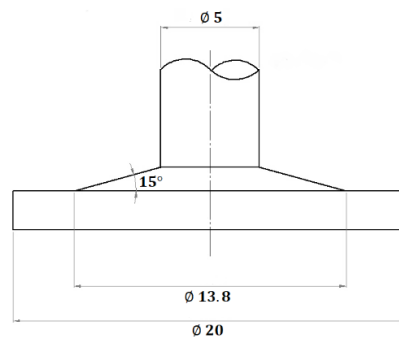
$$h_r = \frac{4V_r}{\pi(d_{ic}^2 - d_v^2)} \approx 39 \text{ mm} \quad (2.14)$$

Além de espaço suficiente para o reagente, o copo deverá ainda apresentar um furo na sua lateral que possibilite a introdução do reagente. Este furo terá um diâmetro de 8 mm e deverá apresentar um afastamento mínimo de 2 mm, tanto da altura limite do reagente,  $h_r$ , como do fim da rosca existente no topo do copo. Considerando estas dimensões e a ainda, altura da rosca de ligação do copo à tampa, foi obtida uma altura final do copo,  $h_c = 64$  mm (Figura 2.19).



*Figura 2.19 - Dimensões do copo do reagente. (mm)*

Uma vez dimensionado o copo do reagente é então possível determinar as dimensões do disco da válvula de depósito, este terá um diâmetro de 20 mm que corresponde ao diâmetro exterior do copo. Para facilitar o escoamento do reagente, a face superior do disco apresenta, numa zona compreendida entre o diâmetro interior do copo e o corpo da válvula, uma superfície cônica com 15° de amplitude (Figura 2.20).



*Figura 2.20 - Dimensões disco da válvula de depósito. (mm)*

Para além do disco da válvula, nesta fase é ainda possível determinar a altura do corpo da válvula, com base na altura do copo e das dimensões da sua rosca, anteriormente mencionadas (Figura 2.21).

Finalmente, na extremidade oposta da válvula que irá estar na parte exterior do reator, foi ainda concebido um pequeno veio de geometria quadrangular com o objetivo de aí introduzir uma manivela para controlar a válvula. Desta forma, foi obtida a seguinte geometria apresentada na Figura 2.21 para a válvula de depósito, a altura da zona posterior à rosca M5, depende da altura da tampa do reservatório e do espaço ocupado no topo do reservatório pelo sistema de controlo de pressão.

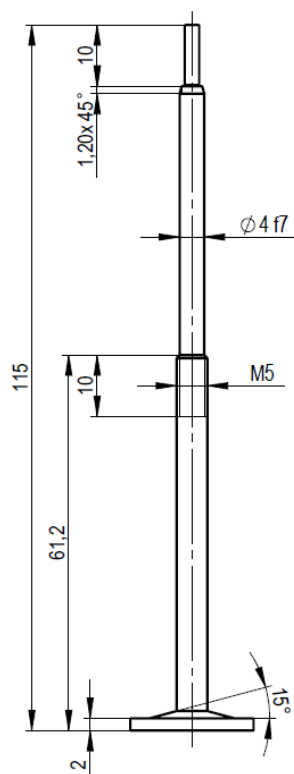


Figura 2.21 - Dimensões válvula de depósito. (mm)

De igual forma a geometria da manivela que irá garantir o controlo da válvula de depósito pode ser observada na seguinte figura.

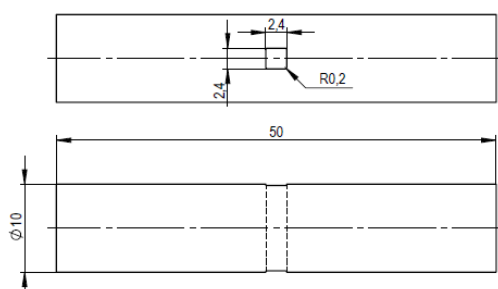
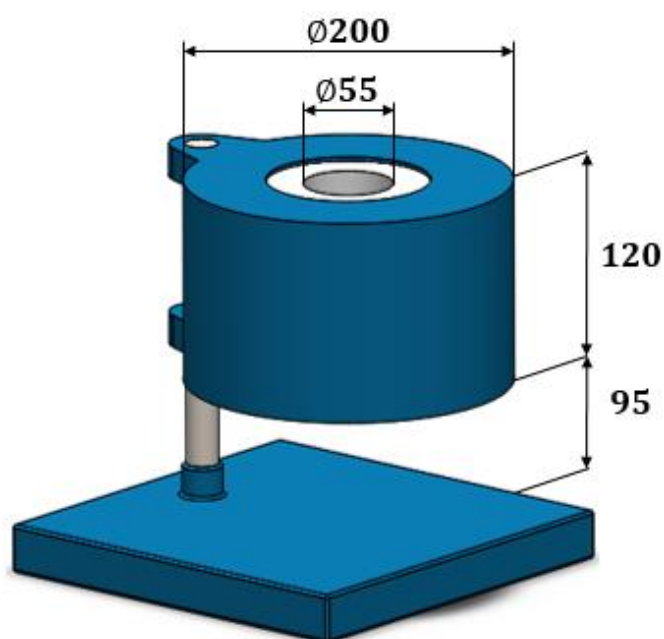


Figura 2.22 - Dimensões da manivela da válvula de depósito. (mm)

### 2.4.2. Sistema de controlo de temperatura

Este sistema tem como principal função aquecer o interior do reator até à temperatura de projeto,  $T_p$ , e manter esse valor de temperatura durante o decorrer de cada experiência. Como referido no subcapítulo 2.2, para impor a temperatura no interior do reator será utilizado um forno elétrico vertical. O forno que existente no laboratório onde o reator irá funcionar, foi contruído por encomenda pela empresa TERMOLAB® e a sua função é precisamente a de aquecer este tipo de reatores. Este forno apresenta uma potência de funcionamento de 750 W, podendo atingir uma temperatura máxima de 500 °C. As suas dimensões encontram-se apresentadas na seguinte figura.



*Figura 2.23 - Dimensões do forno. (mm)*

O forno encontra-se ainda ligado a um controlador Eurotherm®, que permite controlar a temperatura no interior do reator. Este tem incorporado um cabo de ligação a um termopar, o que lhe possibilita registar o valor de temperatura do reagente, comparar esse valor com o valor parametrizado para cada experiência e de seguida, ajustar o calor que é fornecido ao reator, de modo a manter a temperatura constante no seu interior.

Para introduzir o termopar no interior do reator é necessário conceber ainda um elemento que o envolva, para que este não esteja em contacto direto com o reagente. Desta forma, foi concebido um tubo fechado numa das extremidades, a que se deu o nome de Proteção do termopar e cuja geometria se encontra apresentada na Figura 2.24.

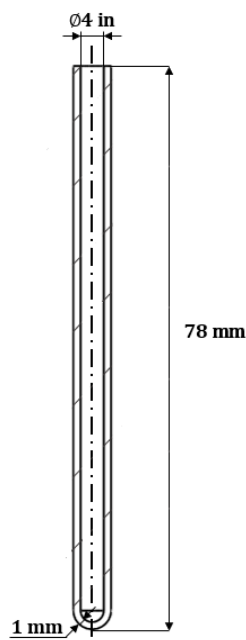


Figura 2.24 - Dimensões proteção termopar.

Relativamente à sua geometria é apenas importante referir que esta proteção será ligada à tampa do reator através de uma ligação soldada que será estudada no subcapítulo 2.4.5. A altura deste componente foi definida com base no comprimento necessário para garantir que se encontra em contacto com o reagente existente no fundo do reservatório.

### 2.4.3. Sistema de controlo de pressão

No subcapítulo 2.2 foi referido que a função principal deste sistema consiste na alimentação e controlo da pressão no interior do reator. Foi também referido que dada a necessidade de utilizar uma válvula de retenção, para controlar a saída solução do interior do reator, este sistema deverá apresentar ainda outras duas funcionalidades. Sendo estas a alimentação da saída da válvula de retenção com o gás proveniente da garrafa e o controlo da altura em que ocorre o congelamento da solução.

Em primeiro lugar, para estabelecer a ligação entre os diferentes componentes deste sistema, é necessário selecionar os tubos que constituem o circuito de pressão. Uma vez que neste projeto, a maior parte dos componentes utilizados apresentam ligações do tipo *Swagelok Medium Pressure Tube Fittig*, os tubos selecionados terão de ser os adequados para funcionar neste tipo de ligação. Para além desse facto, é necessário ter em conta que a pressão de funcionamento recomendada para estes tubos terá de ser superior a 200 bar.

Para este projeto, foram então selecionados a partir dos catálogos da empresa SWAGELOK®, tubos de aço inoxidável sem costura, com um diâmetro exterior 1/4 in. As suas especificações e referência podem ser observados na seguinte tabela.[24]

Tabela 2.9 - Especificações dos tubos aço inox – Série FK.[24]

Díâmetro Exterior OD in.	Espessura da Parede in.	Referência	Peso Kg/m	Pressão máx. Funcionamento bar
1/4	0.035	SS-T4-S-035-6ME	0.12	350

O valor de pressão máxima de funcionamento sugerido na Tabela 2.9 é válido apenas para temperaturas até 37 °C. Em aplicações como a deste projeto, em que as temperaturas envolvidas são mais elevadas, deve-se multiplicar esse valor de pressão por um fator de compensação. Nos catálogos é sugerido o seguinte cálculo, para determinar a pressão de funcionamento,  $PF$ , destes tubos a uma temperatura de 315 °C.[24]

$$PF = 0.85 \times 350 = 298 \text{ bar} \quad (2.15)$$

Como se pode observar, este valor é bastante superior aos 200 bar considerados neste projeto, pelo que é válida a utilização destes tubos para compor este circuito de pressão.

A conceção deste sistema pode ser dividida em três partes distintas, consoante cada uma das funções que este tem de garantir. A primeira função consiste na alimentação e controlo de pressão no interior do reator. Como tem vindo a ser referido, esta parte do sistema deverá ser ligada ao reator através da sua tampa. O controlo da pressão é realizado de duas maneiras distintas, numa primeira fase é necessário introduzir o gás pressurizado proveniente da garrafa no interior do reator. Para o fazer foi estabelecido que a sua tampa deverá apresentar um furo, onde será possível introduzir um tubo tipo apresentado na Tabela 2.9. Este tubo será ligado a uma união em forma de T, na qual se encontram também ligados um manómetro e uma válvula de agulha, conforme mostra a Figura 2.25.

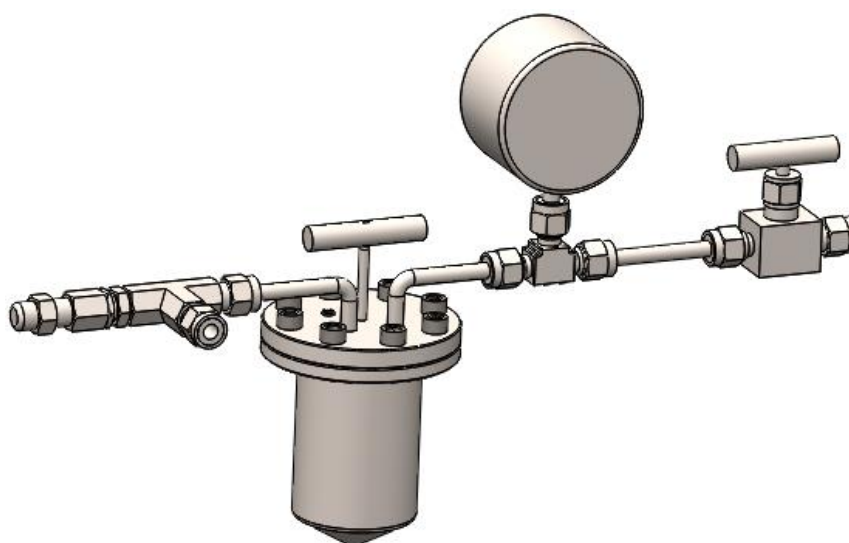






Figura 2.25 - Parte do sistema relativa ao controlo de pressão no interior do reator.



As dimensões dos tubos utilizados dependem do posicionamento relativo entre os componentes e podem ser consultadas em apêndice. É ainda importante referir que o tubo que irá ligar este circuito ao reator foi dobrado de forma a libertar o espaço no topo do reator. Nos catálogos é indicado que para realizar esta dobra num tubo com um  $OD = \frac{1}{4}$  in é necessário um comprimento mínimo de tubo a direito de 13/16 in.

Numa segunda fase para finalizar a parte do controlo de pressão, é necessário ligar uma válvula de segurança ao interior do reator. Esta tem de ser introduzida num circuito diferente do de alimentação de pressão, pelo que a tampa terá de apresentar outro furo. Neste furo será então introduzido o tubo onde liga a válvula de segurança (Figura 2.25). Na Tabela 2.10 encontram-se as referências, de cada um destes componentes e da sua ficha técnica, que pode ser consultada em anexo.

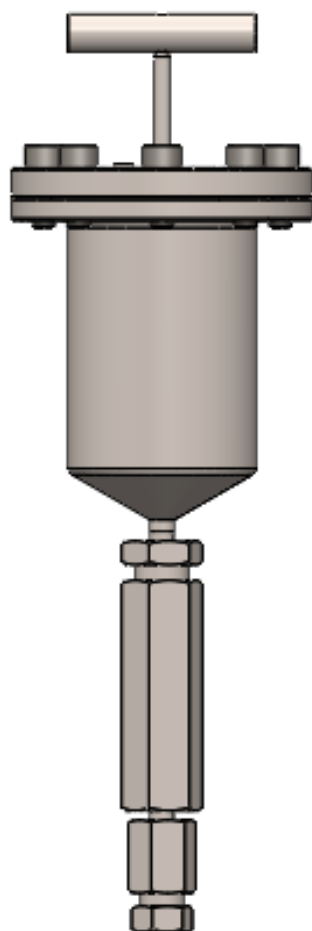
*Tabela 2.10 - Referências dos elementos de controlo de pressão no interior do reator.[25]–[28]*

Componente	Referência	Anexo	
<b>União em T</b>	SS-4FK0-3	5	
<b>Manómetro</b>	PGI-63S-LG25-LAQX	Não disponível	
<b>Válvula de Agulha</b>	SS-20VS4	2	
<b>Válvula de Segurança</b>	SS-4R3A-NE-F	4	

Todos os componentes acima apresentados são para funcionar em tubos com um  $OD = \frac{1}{4}$  in. O manómetro seleccionado tem um mostrador com 63 mm de diâmetro e permite uma leitura até 25 MPa. A ligação ao circuito de pressão é realizada na zona inferior do manómetro, foi também definido que este não terá líquido de preenchimento, o que lhe permite suportar temperaturas mais elevadas.

A válvula de agulha seleccionada apresenta uma pressão máxima de funcionamento de 259 bar e o material utilizado nas suas vedações é o termoplástico PEEK, pelo que esta suporta temperaturas de fluido até 315 °C. Finalmente relativamente à válvula de segurança esta apresenta uma gama de funcionamento dos 206 até 275 bar pelo que, dentro desse intervalo pode ser parametrizado qualquer valor de pressão como o valor máximo que é possível atingir no interior do reator. Para valores de pressão acima do estabelecido, a válvula ficará aberta até que a pressão no interior do reator volte a diminuir para esse valor.

Como foi explicado no subcapítulo 2.2, a segunda função que este sistema tem de garantir é o controlo da altura em que ocorre a saída da solução reator. Para executar esta função é utilizada uma válvula de retenção, que se encontra ligada ao fundo do reservatório através de um tubo, como mostra Figura 2.26.



*Figura 2.26 – Parte do sistema relativa ao controlo da solução no interior do reator.*

Nos catálogos consultados, a única válvula deste tipo que reúne todas as características necessárias para ser introduzida no interior do forno, apresenta uma ligação com rosca NPT. Isto implica que os tubos utilizados no resto do circuito de pressão não podem ser ligados a este tipo de válvula. Como forma de ultrapassar este problema, foi selecionado um outro tubo, com as características apresentadas na Tabela 2.11, para ligar o fundo do reator a esta válvula. Foi selecionado um tubo com uma espessura de parede superior de modo a abrir na sua extremidade a rosca NPT com 1/4. Neste projeto pretende-se que este tubo tenha o mínimo comprimento necessário para a montagem, como pode ser consultado em Apêndice.

*Tabela 2.11 - Especificações dos tubos aço inox – Série IPT.[25]*

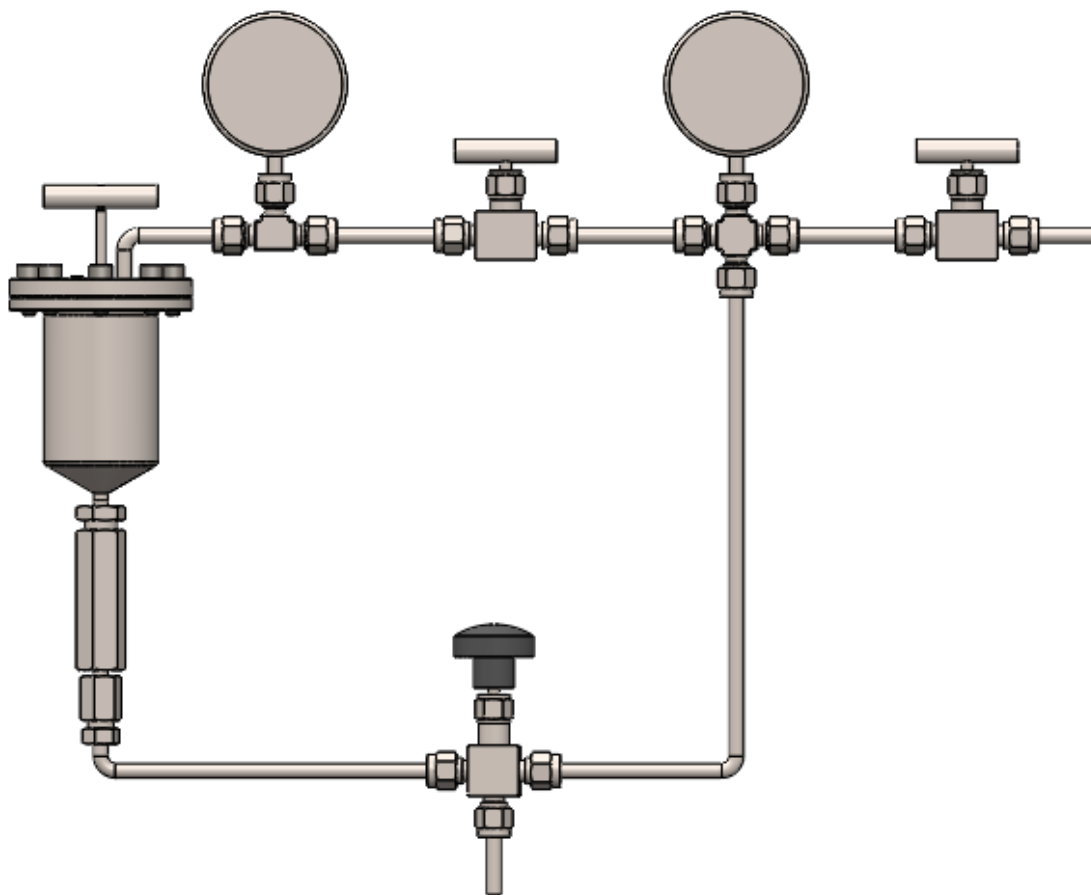
Diâmetro Exterior OD in	Espessura da Parede in	Referência	Peso Kg/m	Pressão Máx. Funcionamento bar
1/4	0.095	SS-T4FK-S-095-20-S	0.24	1034

Uma vez que há a necessidade de alimentar a outra extremidade da válvula de retenção com a pressão proveniente da garrafa, esta extremidade encontra-se ligada a um adaptador macho (Figura 2.26). Este adaptador apresenta uma rosca NPT macho, que permite a sua ligação à válvula e uma ligação do tipo *Swagelok Tube Fitting*, que possibilita a ligação ao circuito de pressão. Na Tabela 2.12 encontram-se as referências, de cada um destes componentes e da sua ficha técnica, que pode ser consultada em anexos.

*Tabela 2.12 - Referências dos elementos de controlo da solução no interior do reator.[25]*

Componente	Referência	Anexo	
<b>Válvula de Retenção</b>	CV4NFB15	Não disponível	
<b>Adaptador Macho NPT</b>	SS-4FK0-1-4	7	



Finalmente, a última função que este sistema tem que garantir é a alimentação de pressão à saída da válvula do fundo do reservatório. Para o fazer foi criado um segundo circuito, que liga o circuito de pressão original à saída da válvula de retenção. De modo a controlar o valor da pressão, foram introduzidos nesta nova ligação mais um manómetro e uma válvula de agulha (Tabela 2.10), de acordo com a montagem apresentada Figura 2.27.



*Figura 2.27 – Circuito de pressão do equipamento.*

Como é possível observar, para estabelecer a ligação entre os dois circuitos de pressão e possibilitar ainda a montagem do manómetro, foi utilizada uma ligação em cruz. Uma vez que foi necessário ligar o circuito de pressão à saída do reservatório, foi ainda introduzida neste uma válvula de agulha com três vias. Esta permite um escoamento contínuo de fluido pelas suas laterais e uma regulação ON/OFF na saída inferior. Desta forma, é possível extrair de forma rápida a solução do interior deste circuito. Na Tabela 2.10 encontram-se as referências, de cada um destes componentes e da sua ficha técnica, que pode ser consultada em anexos

Tabela 2.13 - Referências dos elementos do circuito de pressão.[25], [27]

Componente	Referência	Anexo	
<b>União em Cruz</b>	SS-4FK0-4	6	
<b>Válvula de Agulha 3 Vias</b>	SS-1VS4-X	3	

#### 2.4.4. Reservatório

Para aquecer o reator, este deverá ser inserido no interior do forno apresentado anteriormente no subcapítulo 2.4.2. Como diâmetro dessa zona interior corresponde a 55 mm, foi estabelecido que o diâmetro exterior do reservatório seria,  $D_R = 50$  mm, de forma a otimizar o espaço disponível.

Uma vez definido o diâmetro exterior do reservatório, pode-se então determinar a sua espessura. Para o fazer, tomou-se a opção de calcular em primeiro lugar um valor aproximado para essa espessura,  $t_R$ , recorrendo à teoria de reservatórios cilíndricos sob pressão. Para a realizar este cálculo é necessário aproximar o reservatório em estudo, a um reservatório cilíndrico com dimensões equivalentes (Figura 2.28).

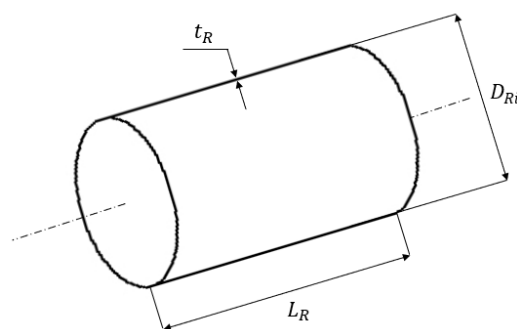


Figura 2.28 - Dimensões do reservatório equivalente utilizado no cálculo da espessura.

Note-se que para o presente caso é considerado um reservatório cilíndrico cujo diâmetro é equivalente ao diâmetro interior do reservatório,  $D_{Ri}$ . No entanto este pode ser escrito em função da espessura reservatório e do seu diâmetro exterior, a partir da seguinte expressão:

$$D_{Ri} = D_R - 2t_R \quad (2.16)$$

É ainda considerado para esse reservatório equivalente um comprimento,  $L_R$ , que corresponde à altura do reservatório e a espessura,  $t_R$ , que se pretende determinar. Para o fazer é necessário estabelecer as equações que refletem o equilíbrio entre as forças de pressão aplicadas no reservatório e as forças resistivas do material. Para obter essas equações são executados dois cortes ao longo do reservatório equivalente, um segundo um plano longitudinal e outro segundo um plano transversal ao seu eixo, como mostra a Figura 2.29.

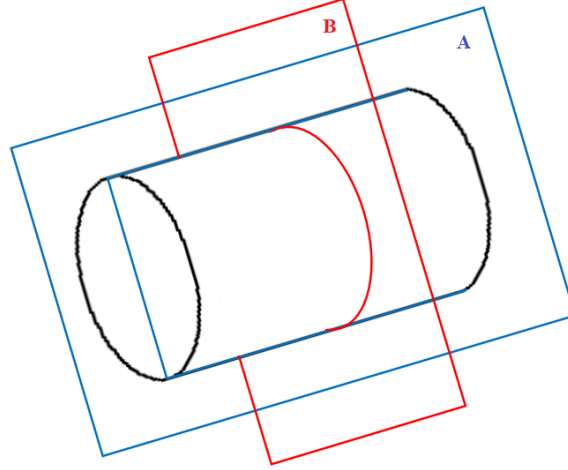


Figura 2.29 - Planos de corte do reservatório equivalente.

Esse corte do cilindro pelos planos A e B dá origem aos semi-corpos A e B respetivamente, como é possível observar na Figura 2.30. Nesta encontram-se também representados os equilíbrios de forças em cada semi-corpo, resultantes da separação de um corpo em duas metades.

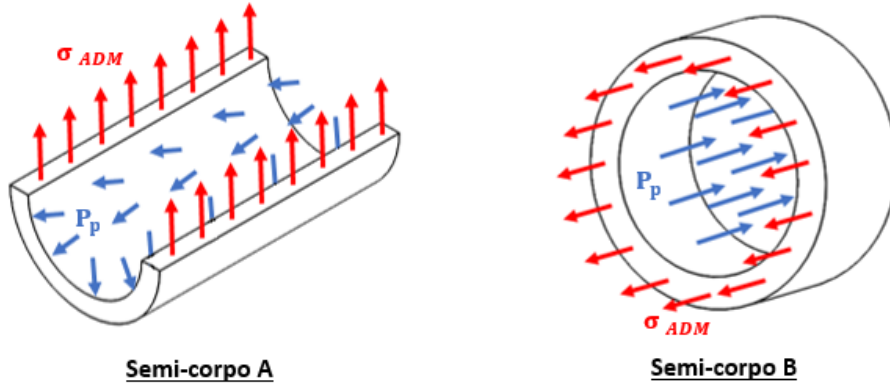


Figura 2.30 – Semi-corpos obtidos a partir da interceção do reservatório equivalente pelos planos A e B.

Resolvendo as equações de equilíbrio em cada semi-corpo, foram obtidas as seguintes expressões:

$$\Sigma F_A = 0 \Leftrightarrow \sigma \times 2t_R L_R = P_p D_{Ri} L_R \Leftrightarrow 2\sigma t_R = P_p D_{Ri} \quad (2.17)$$

$$\Sigma F_B = 0 \Leftrightarrow \sigma \times \pi D_{Ri} t_R = P_p \times \frac{\pi}{4} D_{Ri}^2 \Leftrightarrow 4\sigma t_R = P_p D_{Ri} \quad (2.18)$$

Repare-se que o termo relativo ao comprimento do reservatório foi anulado, pelo que nesta fase, ainda não é necessário conhecer o seu valor exato. Aplicando a equação (2.16) nas equações anteriores e resolvendo-as em ordem a  $t_R$  obtiveram-se as seguintes expressões:

$$t_{R.A} = \frac{P_p D_R}{2(\sigma_{ADM} + P_p)} \quad (2.19)$$

$$t_{R.B} = \frac{P_p D_R}{2(2\sigma_{ADM} + P_p)} \quad (2.20)$$

Como se pode verificar, o valor da espessura obtido a partir do equilíbrio de forças no semi-corpo A será sempre superior ao valor obtido em B, pelo que foi obtido um valor aproximado para a espessura de  $t_R = 4.05$  mm. Com o objetivo de encontrar o valor final dessa espessura, realizou-se uma análise estática estrutural, na qual se fez variar o valor dessa espessura até obter uma distribuição de tensões aceitável nas paredes do reservatório. Esta análise foi realizada através do método dos elementos finitos, com recurso à ferramenta ANSYS® Workbench 18.0. Para a sua realização considerou-se uma geometria equivalente à geometria final do reservatório, que pode ser observada na Figura 2.31. Relativamente a esta, é importante referir que algumas das suas dimensões, como é o caso da altura do reservatório, penas serão apresentadas posteriormente.

O topo deste reservatório equivalente foi tapado por um disco com diâmetro igual a  $D_R$  e altura igual à espessura  $t_R$ . A abertura existente no fundo do reservatório também foi obstruída por um cilindro com uma altura equivalente à espessura do reservatório.

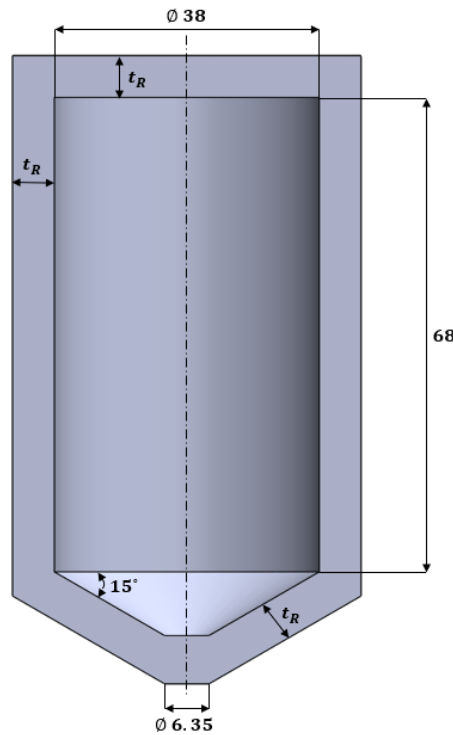


Figura 2.31 - Dimensões do reservatório equivalente, utilizado na análise de elementos finitos para determinação da espessura. (mm)

Esta análise tem como único objetivo a determinação da espessura do reservatório através da aplicação de pressão nas faces interiores de um reservatório equivalente. Posteriormente, no Capítulo 3 irão ser realizadas outras análises as quais vão permitir confirmar de forma mais detalhada outras considerações tomadas ao longo deste projeto como a espessura da tampa, o estudo da ligação entre esta e o reservatório ou ainda, os efeitos da temperatura nas tensões produzidas nos diversos elementos.

Na presente análise considerou-se que a face superior da tampa deste reservatório equivalente se encontra ligada a uma placa plana rígida, o que implica que os deslocamentos nessa face sejam nulos. Procedendo desta forma é possível eliminar as tensões produzidas na tampa e mais importante ainda, as tensões produzidas na zona de ligação entre a tampa e a parede do reservatório. Esta aproximação é válida para o presente caso, porque a geometria da tampa e da zona de ligação não se aproximam da realidade, não sendo por isso interessante nesta fase conhecer o valor das tensões nessas regiões. Por outro lado, procedendo desta forma é possível obter uma leitura mais precisa dos valores das tensões nas paredes do reservatório e na zona de mudança de geometria.

Iniciou-se então esta análise com um reservatório de geometria de acordo com a Figura 2.31 e com uma espessura  $t_R = 4$  mm, nas suas faces interiores foi aplicada uma condição de pressão de 20 MPa. O resultado desta análise permite obter a seguinte distribuição de tensões apresentada na Figura 2.32.

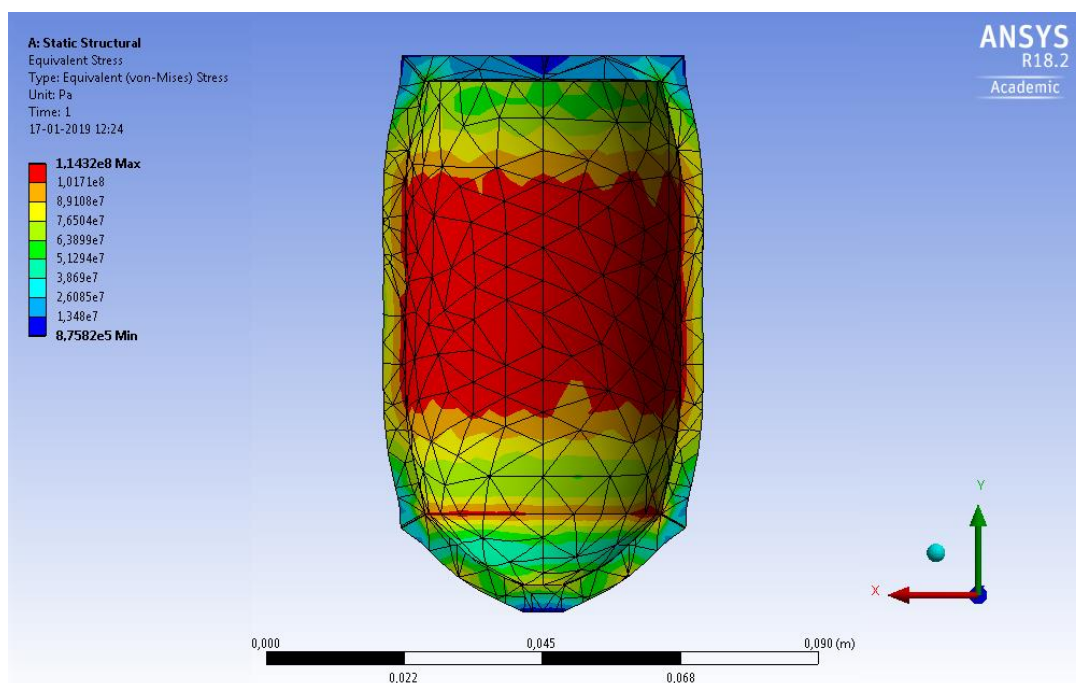


Figura 2.32 - Análise para obtenção da espessura, iteração para  $t_R = 4$  mm.



Como se pode verificar na Figura 2.32, na zona central da parede do reservatório e na zona de mudança de geometria, as tensões ultrapassam o valor de tensão máxima admissível, calculada a partir da equação (2.1). Desta forma, realizou-se uma nova iteração considerando uma espessura  $t_R = 5$  mm. Os resultados dessa análise encontram-se apresentados na Figura 2.33.

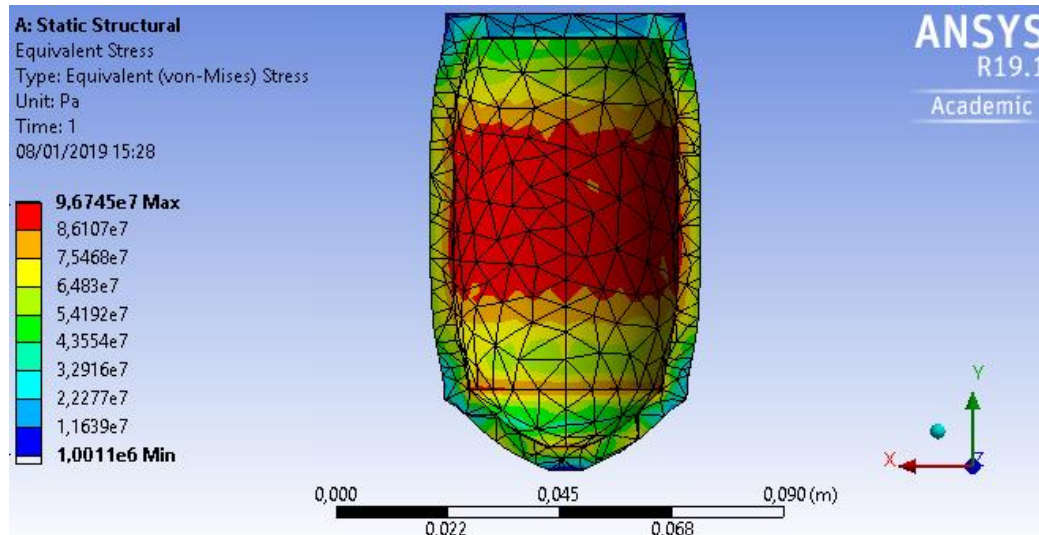


Figura 2.33 - Análise para obtenção da espessura, iteração para  $t_R = 5$  mm.

Como pode ser observado na escala de cores apresentada na Figura 2.33, as tensões encontram-se todas abaixo da tensão máxima admissível conforme é desejado. No entanto, grande parte da zona central da parede do reservatório apresenta tensões muito próximas do seu valor máximo admissível. Tendo em conta esse facto, e considerando que esta análise não contempla o efeito da temperatura no interior do reservatório, houve a necessidade de realizar uma nova iteração. Esta foi inicializada com uma espessura  $t_R = 6$  mm, que como pode ser observado na Figura 2.34 resulta naturalmente numa descida dos valores das tensões nas diferentes zonas.

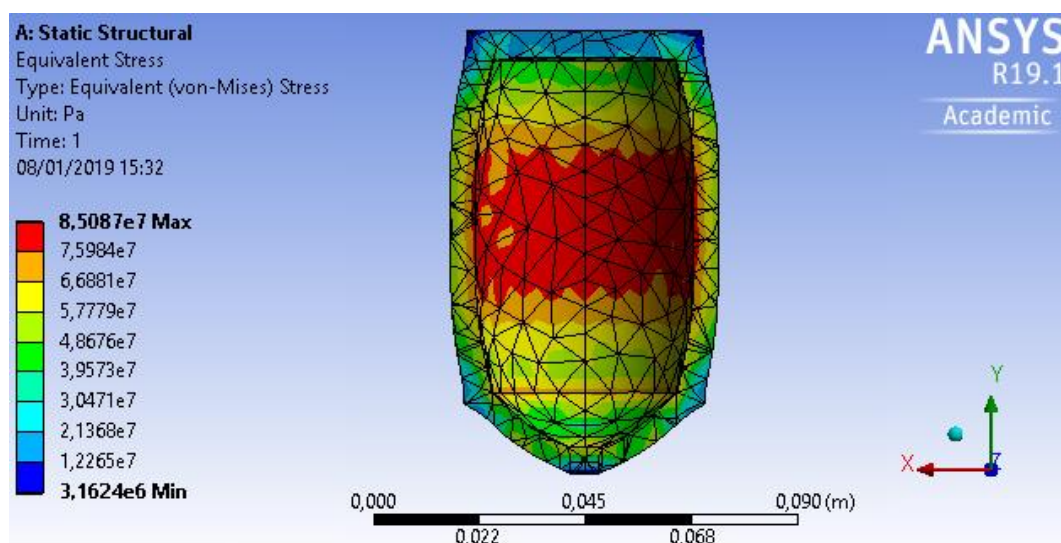


Figura 2.34 - Análise para obtenção da espessura, iteração para  $t_R = 6$  mm.

Uma vez obtido o valor final da espessura do reservatório é então possível determinar o seu diâmetro interior, aplicando a equação (2.16), o que resultou em  $D_{Ri} = 38$  mm. Como mencionado no subcapítulo 2.4.3, no fundo do reservatório irá ser introduzido um pedaço de tubo, para ligar esta zona à válvula de retenção que aí se pretende colocar. É ainda desejável que ao fluido no interior do reservatório possa convergir para a zona central do seu fundo, pelo que essa zona irá apresentar uma geometria cônica, com uma conicidade elevada ( $120^\circ$ ). Como é possível observar na Figura 2.35, a seguir apresentada, zona central do fundo do reservatório apresenta um furo que apresenta um diâmetro de  $\frac{1}{4}$  in. Desta forma será possível introduzir nesta zona o tubo de saída da solução apresentado no subcapítulo 2.4.3. Para estabelecer a conexão entre o tubo e o reservatório será estabelecida uma ligação soldada equivalente à que será mais à frente apresentada no subcapítulo 2.4.5.

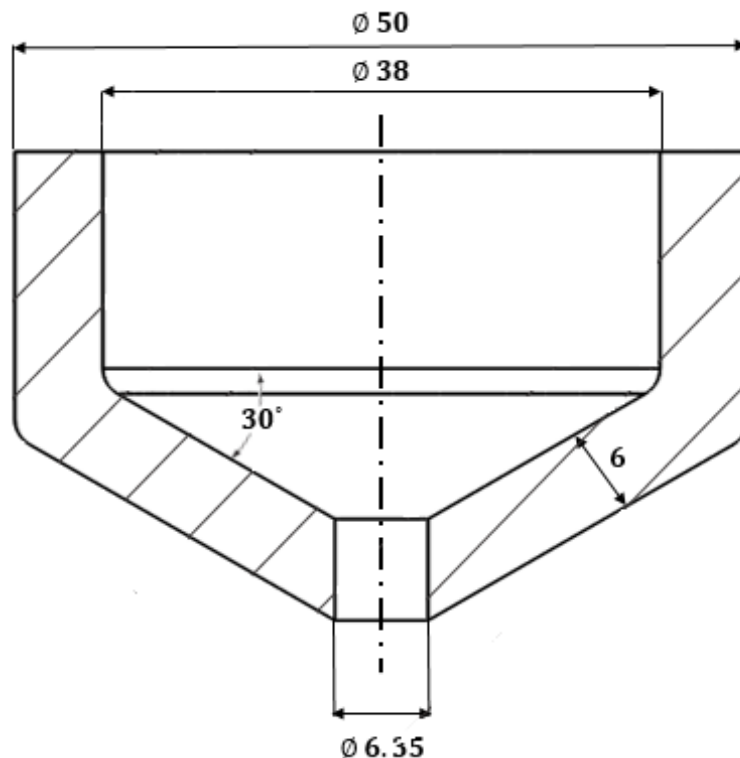


Figura 2.35 - Dimensões do fundo do reservatório. (mm)

Nesta fase tem interesse determinar o volume correspondente a esta zona cônica. De acordo com o esquema apresentado na Figura 2.36, que pretende evidenciar a geometria aparente do corte frontal do fundo do reservatório, o volume desta zona pode ser calculado retirando ao volume cônico deste fundo o volume de um outro cone, com uma base equivalente ao diâmetro do furo. Sendo o volume de um cone,  $V_c$ , dado por:

$$V_c = \frac{\pi r^2 h}{3} \quad (2.21)$$

Pode-se escrever o volume da zona interior do fundo cónico do reservatório,  $V_{fc}$ , da seguinte forma:

$$V_{fc} = \frac{\pi}{3} (r_1^2 (h_1 + h_2) - r_2^2 h_2) \quad (2.22)$$

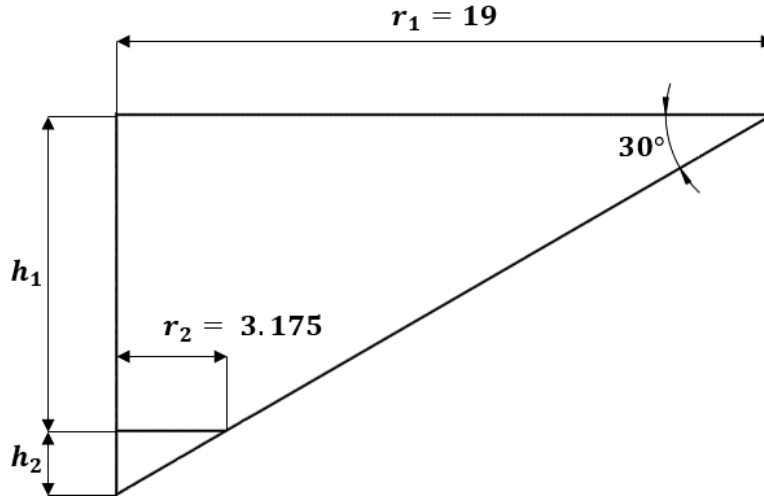


Figura 2.36 Dimensões geométricas dos triângulos representativos do volume do fundo do reservatório.

Uma vez que anteriormente foi definido uma conicidade para esta zona de 120°, as alturas dos respetivos cones podem ser obtidas a partir da semelhança de triângulos sugerida na Figura 2.36, de acordo com a seguinte expressão:

$$\tan(30) = \frac{h}{r} \Leftrightarrow h = r \tan(30) \quad (2.23)$$

Aplicando esta relação na equação (2.22) obtém-se um volume,  $V_{fc} = 4821 \text{ mm}^3$ . Considerando o volume do produto de reação,  $V_s$ , apresentado na Tabela 2.1 é possível ficar a conhecer também a parte deste volume correspondente à parte cilíndrica do reservatório depois de ocorrer a mistura:

$$V_{r,c} = 10 \times 10^3 - 4821 = 5179 \text{ mm}^3 \quad (2.24)$$

Conhecendo este volume, é possível saber qual a altura,  $h_{r2}$ , que o reagente atinge no interior da zona cilíndrica do reservatório. Para isso basta resolver a equação do volume do cilindro em ordem a essa altura da seguinte forma:

$$V_{s,c} = \frac{\pi}{4} D_{Ri}^2 h_{s,c} \Leftrightarrow h_{s,c} = \frac{4V_{s,c}}{\pi D_{Ri}^2} = 4.6 \text{ mm} \quad (2.25)$$

Com o objetivo de tornar mais eficiente a forma como ocorre a mistura dos reagentes, foi definido que quando a válvula de depósito é aberta, o disco que esta apresenta no fundo deverá mergulhar na solução que se encontra no fundo do reservatório, desta forma conclui-se que a parte cilíndrica do reservatório terá uma altura 4 mm superior à altura do copo do reagente, obtendo-se uma altura final,  $h_{s,c} = 68 \text{ mm}$ . Após todas as considerações anteriormente mencionadas obteve-se uma geometria para o reservatório, cujas dimensões podem ser observadas na Figura 2.37.

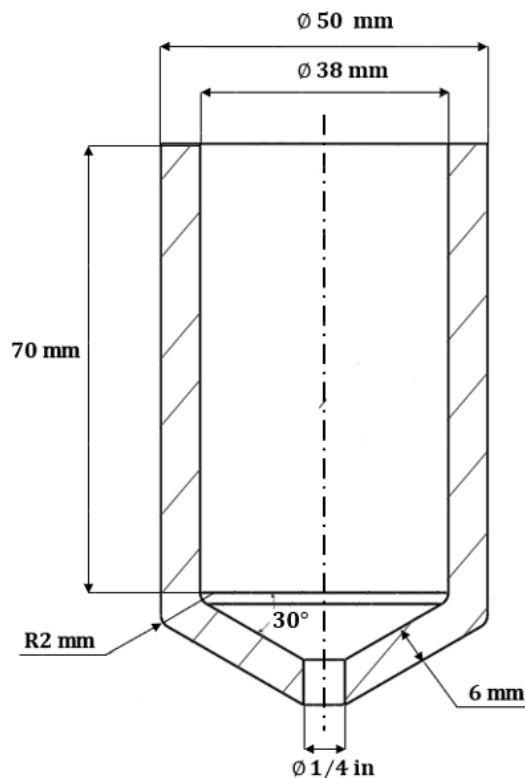


Figura 2.37 - Dimensões reservatório.

Finalmente, é importante referir que para além da geometria apresentada, o topo deste reservatório terá ainda de contemplar uma aba com um diâmetro superior onde possa ser estabelecida uma ligação não permanente com a tampa. Esta zona terá ainda de ser pensada de forma a garantir a estanquicidade do reservatório, o seu estudo irá ser mais à frente apresentado.

#### 2.4.5. Tampa do reator

A geometria geral da tampa corresponde a um disco capaz de obstruir o topo do reservatório. Desta forma, este elemento apresentará um diâmetro equivalente ao diâmetro exterior reservatório. Relativamente à sua espessura, foi definido que esta deveria ser ligeiramente superior à do reservatório, pelo que foram obtidas as seguintes dimensões gerais da tampa do reator, apresentadas na seguinte figura.

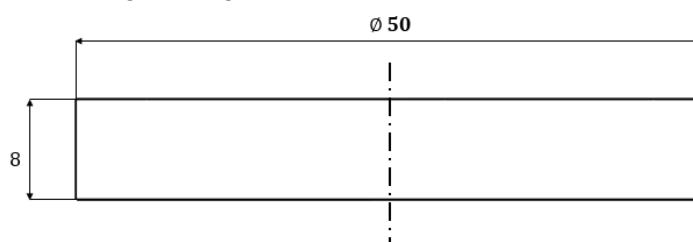


Figura 2.38 - Dimensões gerais da tampa do reservatório

Como tem sido mencionado ao longo deste documento, os diversos sistemas deste equipamento irão estar conectados ao interior do reator através da tampa, pelo que é necessário adaptar a geometria deste elemento á introdução destes sistemas. Em primeiro lugar, a zona central da tampa será ocupada pelo sistema de controlo do início da reação, sendo que a geometria dessa zona já foi devidamente apresentada no subcapítulo 2.4.1 e as suas dimensões podem ser observadas na Figura 2.17. Relativamente aos restantes sistemas, é ainda necessário conceber na tampa três furos, de modo a aí introduzir o tubo de entrada de pressão, o tubo de tomada de pressão para a válvula de segurança e o tubo de proteção do termopar, apresentados nos subcapítulos 2.4.2 e 2.4.3.

Para ligar estes tubos à tampa do reservatório foram estabelecidas ligações soldadas. Uma vez que as peças que se pretendem ligar são fabricadas a partir de aço inox, os tipos de soldadura recomendados para trabalhar com este tipo de material são TIG, MIG ou MMA. Neste projeto decidiu-se estudar a ligação entre um dos tubos de maior diâmetro e a tampa, a fim de determinar a altura do cordão de soldadura,  $h_c$ . As características da soldadura obtidas neste estudo deverão ser replicadas para as restantes ligações soldadas deste projeto. Como é possível observar na Figura 2.39, para estabelecer esta ligação foi utilizada uma soldadura de canto e a força a que esta irá estar sujeita traduz-se numa força paralela a um dos catetos do cordão de soldadura.

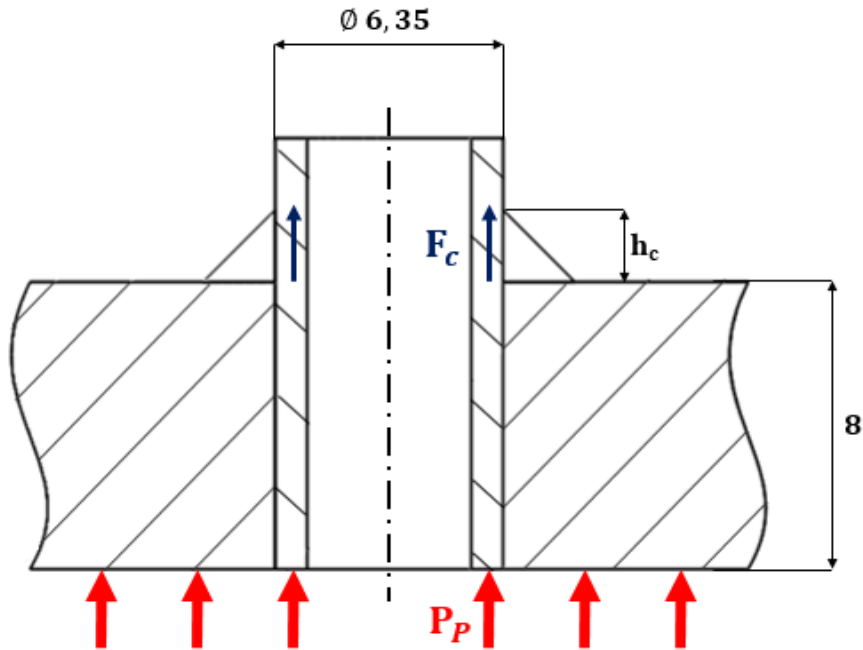


Figura 2.39 – Esquema da ligação soldada entre o tubo de admissão de pressão no reator e a sua tampa, e forças envolvidas.

A força aplicada no cordão,  $F_c$ , resulta da ação da pressão numa área correspondente ao diâmetro exterior do tubo, OD, pelo que esta pode ser calculada a partir da seguinte expressão:

$$F_c = P_p \times \frac{\pi}{4} OD^2 \quad (2.26)$$

Na literatura é sugerida a seguinte equação para o cálculo da tensão na secção crítica do cordão de soldadura, considerando o carregamento anteriormente mencionado.[21]

$$\sigma = 2.16 \frac{F_c}{h_c \Delta_x} \quad (2.27)$$

Nesta equação,  $\Delta_x$  representa o comprimento do cordão de soldadura, no presente caso esse comprimento corresponde ao perímetro exterior do tubo, pelo que este pode ser obtido a partir seguinte expressão:

$$\Delta_x = \pi \times OD \quad (2.28)$$

Para determinar a altura do cordão de soldadura basta reorganizar a equação (2.27) em ordem à altura  $h_c$  e substituir a força e o comprimento do cordão pelas equações (2.26) e (2.28) respetivamente. Obtendo-se a seguinte equação:

$$h_c = \frac{4\sigma_{ADM}}{2.16P_p OD} \quad (2.29)$$

A partir desta expressão foi obtida uma altura para o cordão de soldadura de  $h_c = 1.51$  mm. Considerando todas as adaptações anteriormente mencionadas, foi obtida a seguinte geometria para a zona central do reservatório.

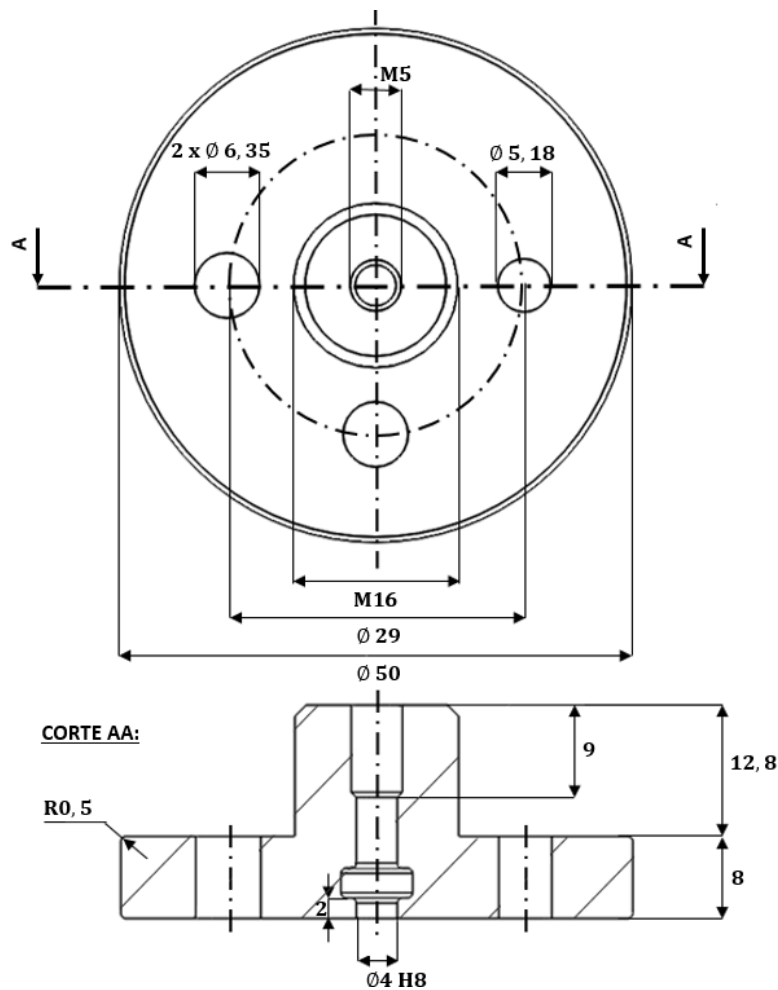


Figura 2.40 - Dimensões da zona central da tampa do reator

À semelhança do que foi anteriormente referido para o reservatório, a sua tampa irá apresentar um diâmetro superior ao diâmetro exterior sugerido na Figura 2.38, de forma a contemplar espaço para a ligação entre estes elementos, essa ligação irá ser então de seguida apresentada.

#### 2.4.6. Ligação entre a tampa e o reservatório

Esta zona de ligação, de acordo com o que foi anteriormente referido, tem como principais objetivos: aguentar os esforços de pressão que são aplicados na tampa; garantir a selagem do reator e permitir o acesso ao interior do reservatório. Desta forma, tomou-se a opção de estabelecer uma ligação aparafusada entre o reservatório e a tampa, uma vez que esta é um tipo de ligação não permanente mais aconselhado para este tipo de aplicações.

A ligação será estabelecida numa aba existente no topo do reservatório, numa zona anterior a esta ligação terá de ser introduzido um O-Ring para garantir a selagem do equipamento, sendo para isso necessário abrir um rasgo de acordo com a informação apresentada na seguinte figura.

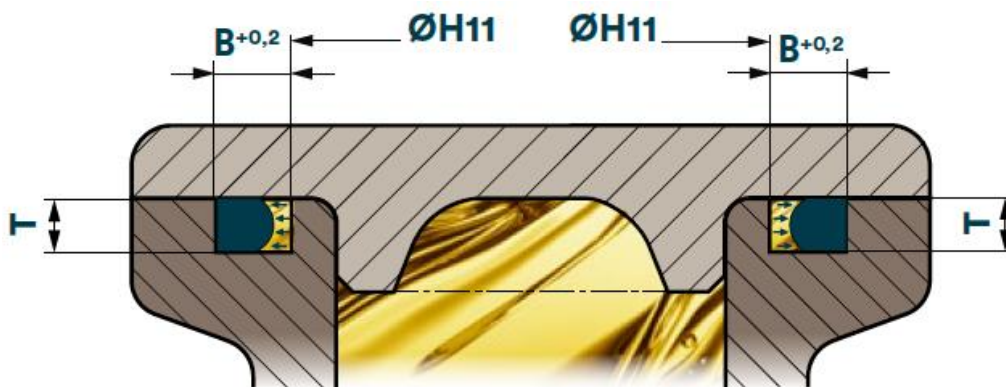


Figura 2.41 - Montagem de um O-Ring para o caso de deformação axial, com pressão no interior e respetivas tolerâncias.[22]

As dimensões do rasgo dependem do diâmetro de seção do O-Ring (Figura 2.14), para esta aplicação foi selecionado um  $d_2 = 3$  mm. Com este diâmetro foi possível obter as dimensões apresentadas na Tabela 2.14, que se encontram de acordo com informação apresentada na Figura 2.41. As condições a que este componente irá estar sujeito são as mesmas que o O-Ring dimensionado no subcapítulo 2.4.1, pelo que a semelhança do anterior, será fabricado a partir de um Perfluoroelastómetro e apresenta uma dureza de 90 Sh.

Tabela 2.14 - Dimensões do rasgo para à introdução do O-Ring no topo do reservatório.[22]

$d_2$ (mm)	B (mm)	T (mm)	Ajuste recomendado para T (mm)
3.00	4.08	2.31	$\pm 0.05$

O rasgo anteriormente referido deve estar afastado no mínimo 2 mm da parede interior do reservatório, de forma a permitir a montagem do O-Ring no seu interior sem comprometer a rigidez deste elemento, o que significa valor mínimo que o seu diâmetro interior,  $d_1$ , pode tomar corresponde a 42 mm. No entanto, uma vez que esta aplicação corresponde a um caso de pressão elevada no interior, o O-Ring deve estar em contacto com a parede mais exterior do rasgo, pelo que tem interesse fazer a seleção deste elemento com base no seu diâmetro exterior,  $d_3$ . Para determinar esse valor é necessário conhecer o diâmetro exterior do rasgo. Este pode ser obtido, considerando o diâmetro mínimo anteriormente referido e o valor sugerido na Tabela 2.14 para o comprimento do rasgo,  $B$ , da seguinte forma:

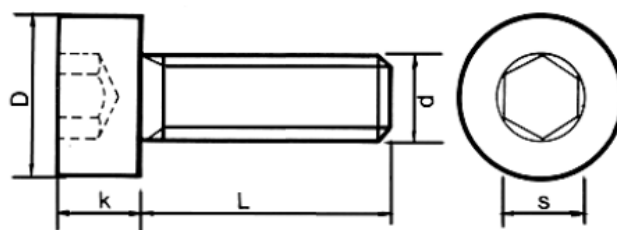
$$42 + 2 \times 4.08 = 50.16 \text{ mm}$$

Arredondando esse valor, foi selecionado um diâmetro exterior do O-Ring,  $d_3 = 50$  mm. Por aplicação da equação (2.10) chegou-se à conclusão que o seu diâmetro interior seria então  $d_1 = 44$  mm, pelo que foi selecionado, dos catálogos da empresa MONROE SEALS®, um O-Ring com as seguintes especificações.[29]

*Tabela 2.15 - Especificações O-Ring de selagem da ligação entre o reservatório e a sua tampa.[29]*

Material	$d_1$ (mm)	$d_2$ (mm)	Referência
KALREZ®	44	3	44 X 3 KALREZ-90

Uma vez selecionado o O-Ring e tendo já em conta o espaço que este ocupa no topo do reservatório, pode-se então dar início ao estudo da ligação aparafusada deste e a sua tampa. Neste projeto tomou-se a opção de utilizar parafusos métricos com cabeça sextavada interior, apresentados na Figura 2.42, porque que a sua cabeça ocupa menos espaço e permitem uma montagem mais fácil para este tipo de aplicações. Para estabelecer a ligação de cada um dos parafusos, é necessária rosca fêmea que deverá ser aberta na aba do reservatório numa zona posterior ao O-Ring. Desta forma para estabelecer o aperto de cada parafuso, basta apenas introduzi-lo por um fundo passante existente na zona mais exterior da tampa e apenas com uma chave de Allen aplicar o momento de aperto requerido para esta ligação.



*Figura 2.42 - Dimensões características de um parafuso de cabeça sextavada interior, totalmente roscado.[30]*



Para realizar o estudo deste tipo de ligação é necessário em primeiro lugar selecionar um parafuso com um determinado diâmetro nominal de seguida, caracterizar a forma como os esforços são aplicados na ligação e finalmente verificar se esta suporta esses mesmos esforços. Para fazer esta verificação, é necessário comparar a força aplicada em cada parafuso com as várias forças máximas admissíveis para cada um dos modos de falha característicos de uma ligação roscada, apresentados no subcapítulo 2.4.1. De modo a garantir que após a aplicação da pressão o reator se mantém fechado, é necessário ainda definir uma força de aperto inicial nos parafusos. Para realizar o estudo desta ligação, foi então pré-selecionado um parafuso M6. As dimensões características da sua rosca foram obtidas por consulta das tabelas apresentadas na literatura e podem ser observadas na Tabela 2.16. [20]

*Tabela 2.16 - Dimensões nominais de uma rosca M6 com passo grosso. [20]*

Rosca M6	
<b>Passo</b>	$p = 1 \text{ mm}$
<b>Diâmetro nominal</b>	$d = 6.000 \text{ mm}$
<b>Diâmetro médio</b>	$d_m = 5.350 \text{ mm}$
<b>Diâmetro interior</b>	$d_i = 4.917 \text{ mm}$

As dimensões correspondentes ao parafuso encontram-se apresentadas na Tabela 2.17, de acordo com a terminologia utilizada na Figura 2.42 e foram obtidas a partir da consulta dos catálogos da empresa Intec®.[30] Dessa consulta conclui-se também que para esta aplicação devem ser utilizados parafusos da classe 8.8, o que corresponde a uma tensão limite de elasticidade  $\sigma_{c,P} = 660 \text{ MPa}$  segundo Shigley e um módulo de elasticidade  $E = 200 \text{ GPa}$ . [21]

*Tabela 2.17 - Dimensões de um parafuso M6 de cabeça sextavada interior, totalmente roscado. [30]*

Parafuso	D mm	k mm	s mm	L mm	Peso kg/1000 peças
M6	10	6	5	16	5.75

Em primeiro lugar foi estudada a hipótese de se utilizar seis parafusos para estabelecer esta ligação. Como pode ser observado na Figura 2.43, os eixos dos parafusos são paralelos entre si e o carregamento que lhes é aplicado, por ação da pressão na tampa do reservatório, é caracterizado por uma força paralela a esses eixos.

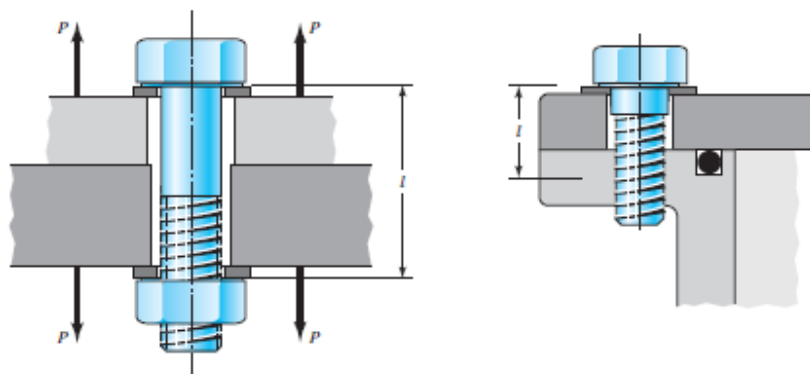


Figura 2.43 - Ligação aparafusada, caso específico de carregamento paralelo aos eixos do parafuso.[21]

Como já foi anteriormente mencionado, a tampa deverá manter-se fechada para qualquer valor de pressão que possa ser introduzido no reator, o que implica que os parafusos tenham de ser apertados com uma pré-carga. A pressão máxima que pode ser atingida no interior do reator corresponde a 220 bar, uma vez que a partir deste valor a válvula de escape deverá ser acionada, conforme explicado anteriormente. De maneira a manter a tampa fechada para valores de pressão até à pressão de ativação da válvula de segurança,  $P_s$ , os parafusos deverão ser apertados com uma força de aperto inicial,  $F_i$ , que pode ser obtida pela seguinte expressão:

$$F_i = \frac{\pi D_{Ri}^2 P_s}{4N} \quad (2.30)$$

Na equação anterior  $N$  representa o número de parafusos, pelo que para o caso em estudo tem-se que  $N = 6$ , obtendo-se desta forma uma força  $F_i = 4.158$  kN. Esta força provoca tração nos parafusos e compressão na tampa do reservatório. Posteriormente, a introdução da pressão no interior do reator irá provocar na tampa do reservatório, uma força paralela aos eixos dos parafusos como é visível na Figura 2.43. Essa força tem tendência a afastar os elementos que compõem esta ligação, o que implica que a força de tração no parafuso irá aumentar e a força de compressão na tampa irá diminuir, de acordo com o diagrama de forças apresentado na Figura 2.44.

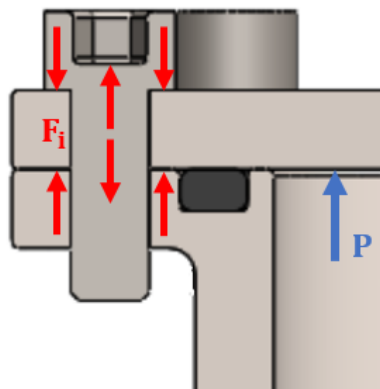


Figura 2.44 - Equilíbrio de forças na ligação aparafusada, após aplicação da pressão no interior do reator.

A aplicação de pressão, para além de originar comportamentos diferentes no parafuso e na tampa, também se traduz de forma diferente para esses elementos, isto porque a rigidez de um é diferente da do outro, o que implica que a força não se propaga de forma igual para os dois elementos. Para determinar a rigidez do parafuso basta aproximar este a um corpo cilíndrico e calcular a rigidez desse corpo quando solicitado a forças axiais, que pode ser dado por:

$$k_p = \frac{A_p E}{l_p} \quad (2.31)$$

Esta equação tem em conta a área de secção do parafuso,  $A_p$  e o seu comprimento tracionado,  $l_p$ , que corresponde à espessura da tampa nessa zona, ou seja  $l_p = 8$  mm. Resolvendo a equação (2.31) obteve-se uma rigidez para o parafuso,  $k_p = 7.0686 \times 10^8$  N/m. Para determinar a rigidez dos elementos comprimidos, considera-se que estes apresentam um certo volume onde a deformação é uniforme, de acordo com a informação sugerida na Figura 2.45.

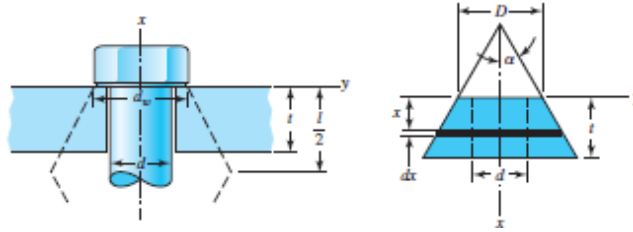


Figura 2.45 - Ligação aparafusada e zona de deformação uniforme dos elementos comprimidos.[21]

Admitindo a condição válida para muitos dos parafusos métricos com cabeça sextavada onde  $\alpha = 30^\circ$  e  $D = 1.5d$ , segundo a nomenclatura da Figura 2.45, a rigidez dos elementos comprimidos pode ser dada por:

$$k_t = \frac{0.577Ed}{2 \ln \left( 5 \frac{0.577l_t + 0.5d}{0.577l_t + 2.5d} \right)} \quad (2.32)$$

À semelhança do que aconteceu anteriormente  $l_t$  representa a espessura dos elementos comprimidos, que no presente caso é igualmente  $l_t = 6$  mm. Desta forma, obteve-se uma rigidez para a parte comprimida da tampa,  $k_t = 5.2190 \times 10^8$  N/m. Uma vez obtidos os valores de rigidez de ambos os elementos, é possível escrever a contante de proporção  $C$ , que relaciona a rigidez do parafuso com a rigidez total da ligação:

$$C = \frac{k_p}{k_p + k_t} = 0.575 \quad (2.33)$$

Finalmente, é possível escrever as expressões que permitem calcular a força resultante no parafuso e na tampa do reservatório respetivamente:

$$F_p = \frac{CP}{N} + F_i \quad (2.34)$$

$$F_t = \frac{(1 - C)P}{N} - F_i \quad (2.35)$$

A força  $P$  corresponde à força a que a ligação aparafusada irá estar sujeita durante o funcionamento do equipamento, ou seja, à força a que a pressão de projeto,  $P_p$ , exerce sobre a tampa do reservatório. Esta pode ser obtida a partir da seguinte expressão:

$$P = \frac{\pi}{4} D_{Ri}^2 P_p = 22,68 \text{ kN} \quad (2.36)$$

De onde se obteve:

$$F_p = 6.33 \text{ kN}$$

$$F_t = -2.55 \text{ kN}$$

Nesta fase, é possível verificar que a força  $F_t$  é negativa, o que implica que após a aplicação da pressão no interior do reator, continuará a existir uma força de compressão que mantém a tampa fechada durante o decorrer das experiências. Para verificar se a rosca correspondente a cada parafuso suporta os esforços que lhe são aplicados, é necessário comparar a força que lhe é aplicada com as forças máximas admissíveis considerando os diferentes modos de falha dos parafusos, para determinar essas forças foram utilizadas as equações (2.3) a (2.6). Neste projeto foi também previamente definido que a aba do reservatório tem uma espessura de 6 mm, uma vez que os parafusos irão ser enroscados neste elemento esse será o comprimento considerado para este estudo. Desta forma, foram obtidos os seguintes valores de força, de acordo com a terminologia anteriormente apresentadas no subcapítulo 2.4.1.

$$F_{1 \text{ máx.m}} = 6.830 \text{ kN}$$

$$F_{2 \text{ máx.m}} = 13.060 \text{ kN}$$

$$F_{2 \text{ máx.f}} = 5.121 \text{ kN}$$

$$F_{3 \text{ máx.m}} = 20.154 \text{ kN}$$

$$F_{3 \text{ máx.m}} = 6.321 \text{ kN}$$

Como é possível verificar, a força aplicada nos parafusos ultrapassa a força máxima  $F_{2 \text{ máx.f}}$ . Para ultrapassar este problema, foi tomada a decisão de utilizar nesta ligação 8 parafusos M6, desta forma é possível manter a simetria da ligação garantindo ainda alguma margem de segurança para o caso de um parafuso falhar ou não ser apertado corretamente. Desta forma, foram obtidos os seguintes valores para as forças anteriormente apresentadas:

$$F_i = 3,119 \text{ kN}$$

$$F_p = 4.749 \text{ kN}$$

$$F_t = -1.914 \text{ kN}$$

Como se pode observar as forças diminuíram o seu valor em módulo para valores abaixo das forças máximas admissíveis e a força nos elementos comprimidos mantém-se negativa, o que significa que a tampa se irá manter fechada.

Uma vez obtido o valor final da força  $F_i$ , é possível calcular, a partir da equação (2.8), o momento de aperto que deve ser aplicado a cada parafuso de forma a estabelecer esta ligação, donde se obteve:

$$T_a = 1.846 \text{ Nm}$$

Após o estudo desta zona de ligação, obtiveram-se as seguintes geometrias para zona da aba do reservatório (Figura 2.46) e para a zona exterior da tampa (Figura 2.47).

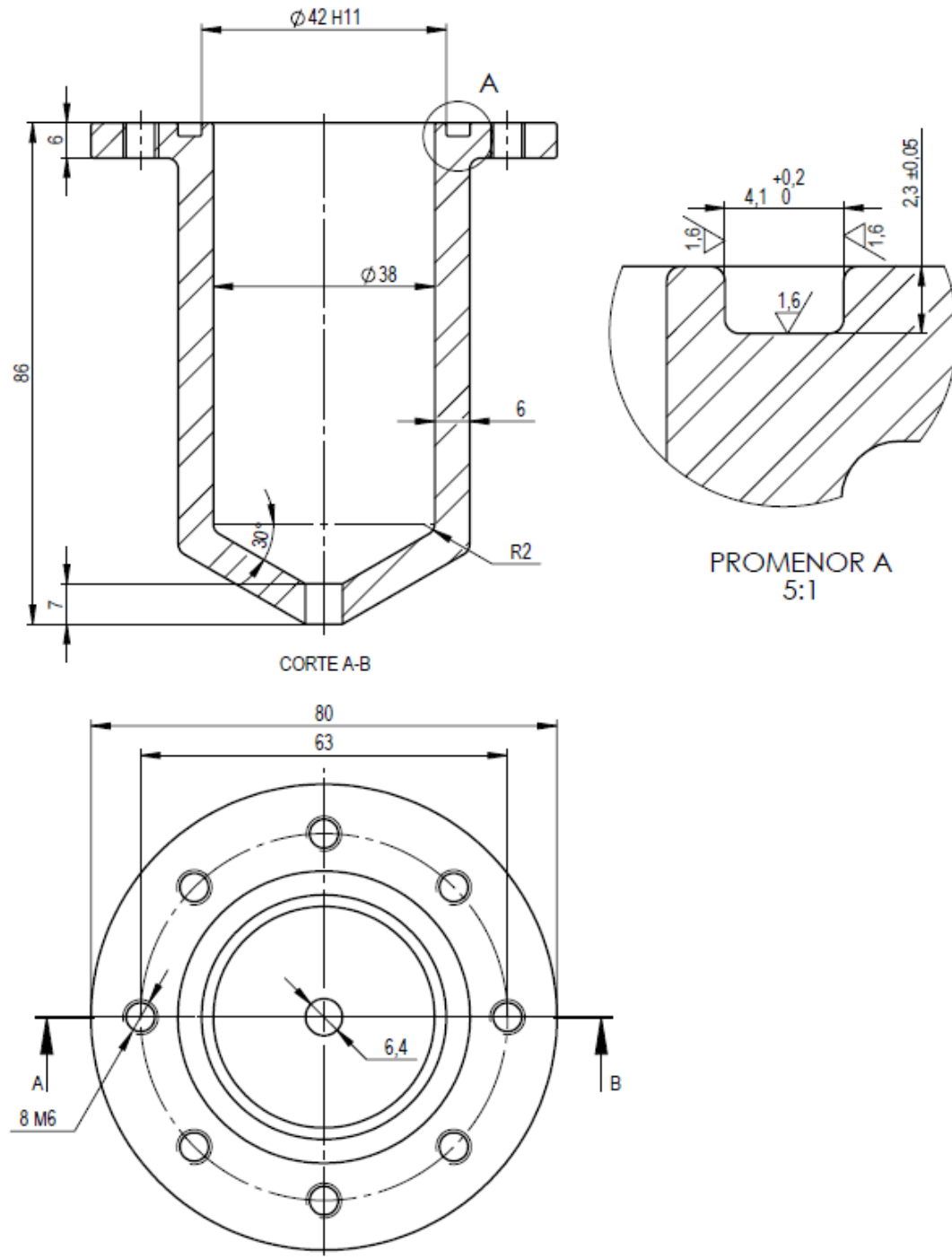


Figura 2.46 - Dimensões da aba do reservatório.

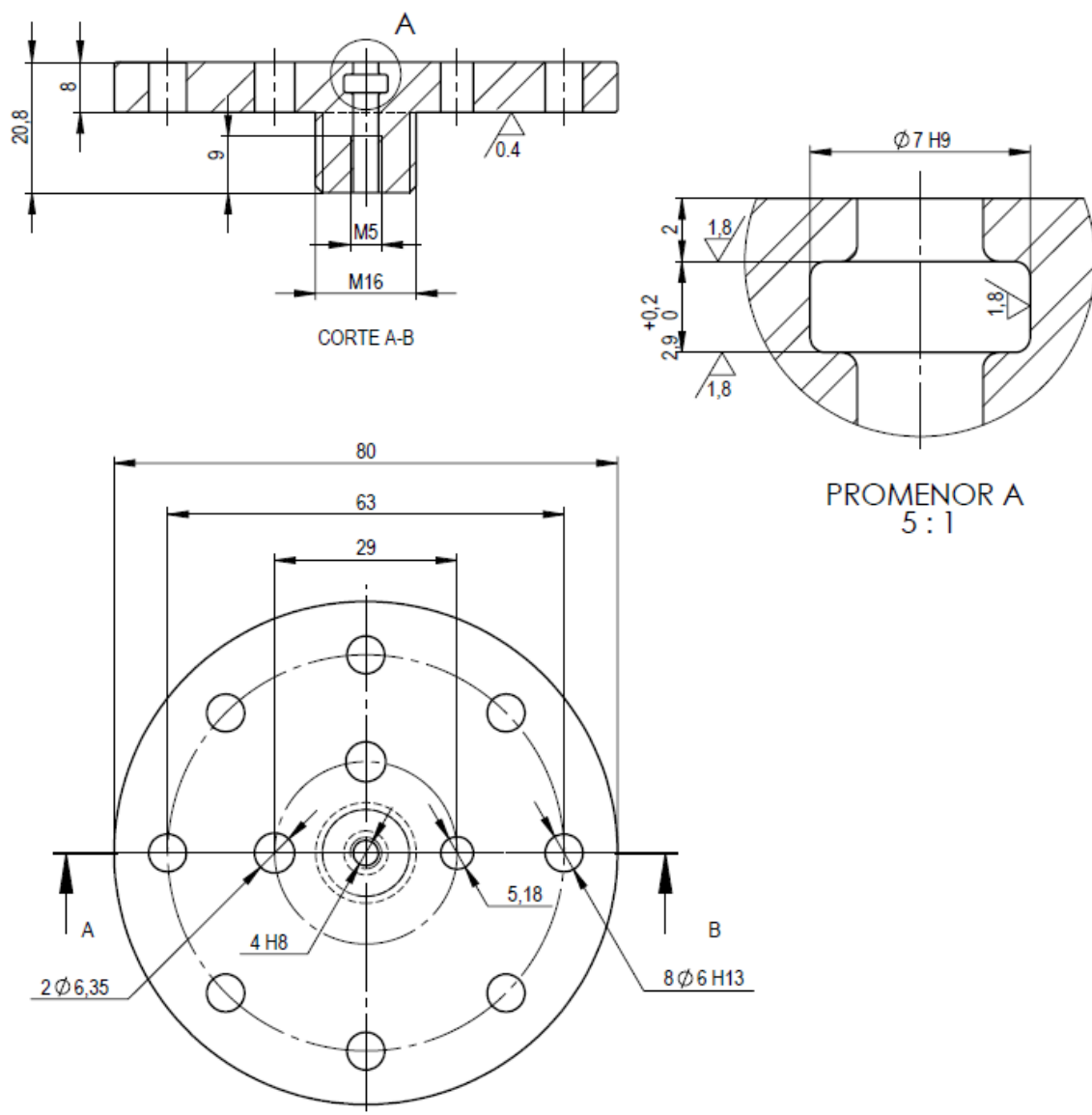
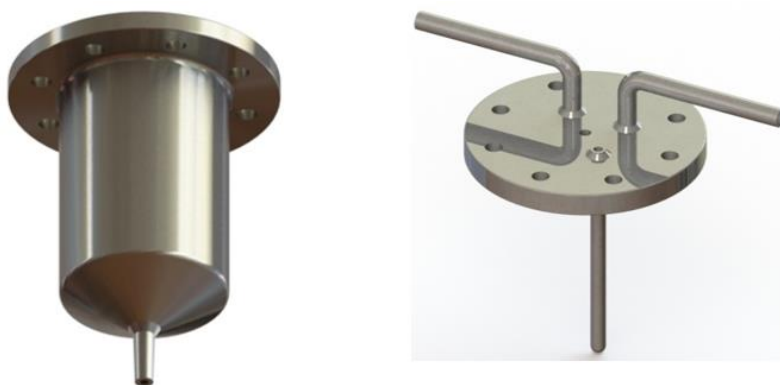


Figura 2.47 - Dimensões da zona exterior da tampa do reator.

## 2.5. Montagem do equipamento

Uma vez concebidos todos os componentes deste equipamento e estudadas todas as ligações entre estes, é possível definir a correta sequência de montagem deste equipamento. Desta forma, inicialmente devem ser concretizadas todas as ligações permanentes, que no caso deste projeto consistem em quatro ligações soldadas. Assim, os tubos de admissão de pressão no interior do reator e na válvula de segurança e ainda, o tubo de proteção do termopar, devem ser introduzidos nos respetivos furos existentes na tampa do reator e seguidamente devem ser soldados a esta. Da mesma forma, o tubo de saída da solução deve ser introduzido no furo existente no fundo do reservatório e deve ser soldado a este, como é possível observar na Figura 2.48.



*Figura 2.48 - Ligações soldadas dos tubos à tampa e ao fundo do reservatório.*

De seguida é necessário concretizar a montagem do sistema de controlo do início da reação na tampa do reator. Para o fazer é necessário em primeiro lugar introduzir o O-Ring no rasgo concebido para este na tampa e enroscar o copo do reagente na rosca que lhe é destinada. Com estes dois elementos já na sua posição de funcionamento, é então possível introduzir, pelo fundo do copo do reagente, a válvula de depósito que irá em primeiro lugar ser ligada à rosca M5 e de seguida passará pelo interior do O-Ring, saindo para o exterior do reator a partir da tampa, como mostra a Figura 2.49.



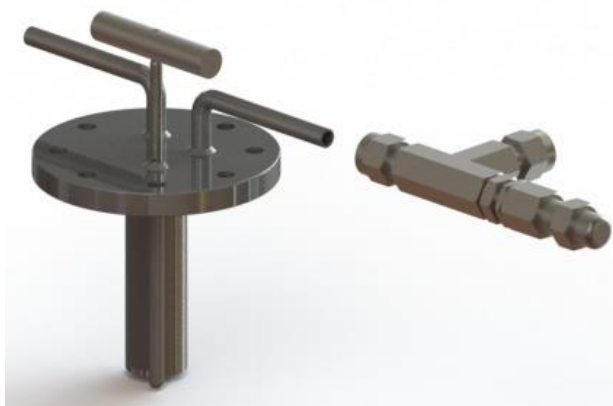
*Figura 2.49 - Montagem do sistema de início de reação na tampa do reator.*

Relativamente à montagem do sistema de pressão, esta deve ser feita em duas fases distintas. Em primeiro lugar a válvula de retenção deve ser ligada ao tubo de saída da solução, introduzido no fundo do reservatório e na sua outra extremidade deve ser introduzido o adaptador macho, conforme mostra a Figura 2.50.



*Figura 2.50 – Montagem da válvula de retenção no fundo do reservatório.*

Nesta fase deve ser também ligado na tampa do reservatório a válvula de segurança, no respetivo tubo de tomada de pressão, de acordo com a Figura 2.51.



*Figura 2.51 - Montagem da válvula de segurança na tampa do reator.*

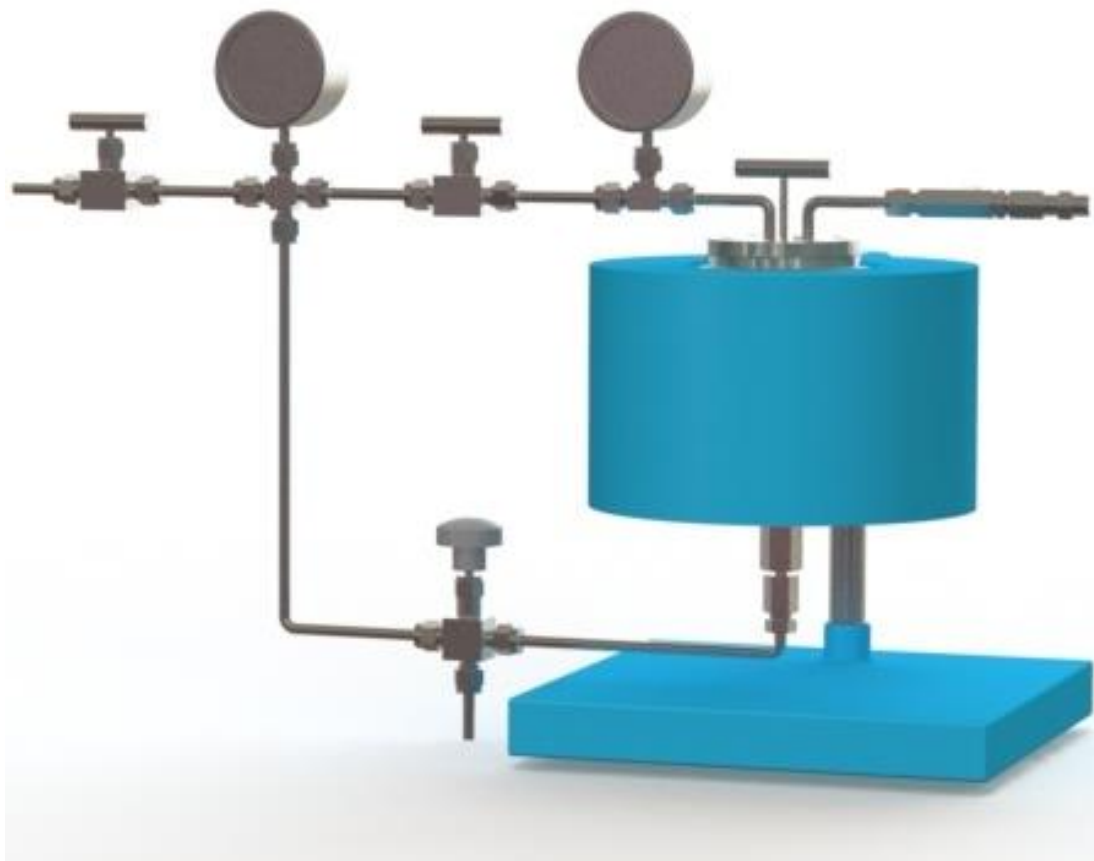


Uma vez executados todos os passos anteriormente referidos, o reservatório deve ser introduzido no interior do forno e o O-Ring no rasgo aberto na sua aba. De seguida, a tampa deve ser colocada na posição de funcionamento, da seguinte forma:



*Figura 2.52 - Montagem do reator no interior do forno.*

A restante parte do sistema de pressão deve ser montada em separado e posteriormente, deve ser realizada a sua ligação à tampa e ao fundo do reservatório, nas respetivas zonas destinadas a cada uma destas ligações (Figura 2.53).



*Figura 2.53 - Montagem final do equipamento.*

Após esta fase, o equipamento fica então preparado para realizar os ensaios previstos. A sequência de procedimentos a executar durante os ensaios será apresentada no Capítulo 4.

## Capítulo 3. Análises de elementos finitos

Neste capítulo pretendem-se apresentar as análises de elementos finitos, que foram realizadas com recurso à ferramenta ANSYS Workbench 18.2 e o têm como objetivo de simular o funcionamento deste equipamento. Com estas análises será possível ter uma ideia do tempo que demora a aquecer o interior do reator até cerca de 300 °C e confirmar se a geometria a que se chegou para os diferentes componentes é a indicada para suportar os esforços de pressão e temperatura que lhes são aplicados. Para simular o funcionamento do equipamento foram realizadas duas análises, uma transiente térmica e outra estática estrutural.

Como pode ser observada na Figura 3.1, a geometria utilizada nestas análises consiste numa montagem do reator, que engloba os seguintes componentes:

- Reservatório
- Tampa do reator
- Válvula de depósito
- Copo do reagente
- Proteção termopar
- 8 Parafusos M6

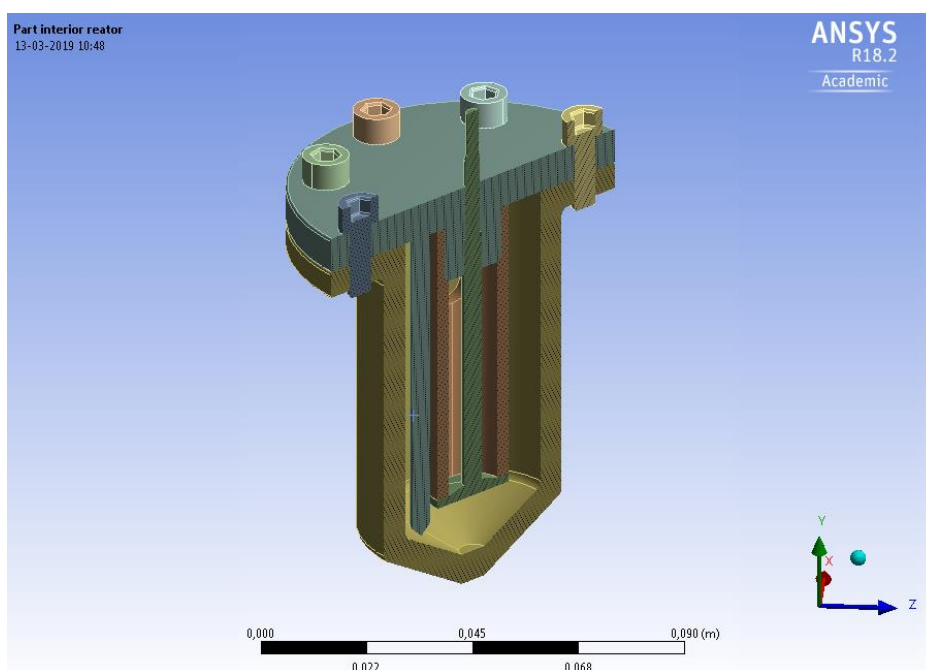
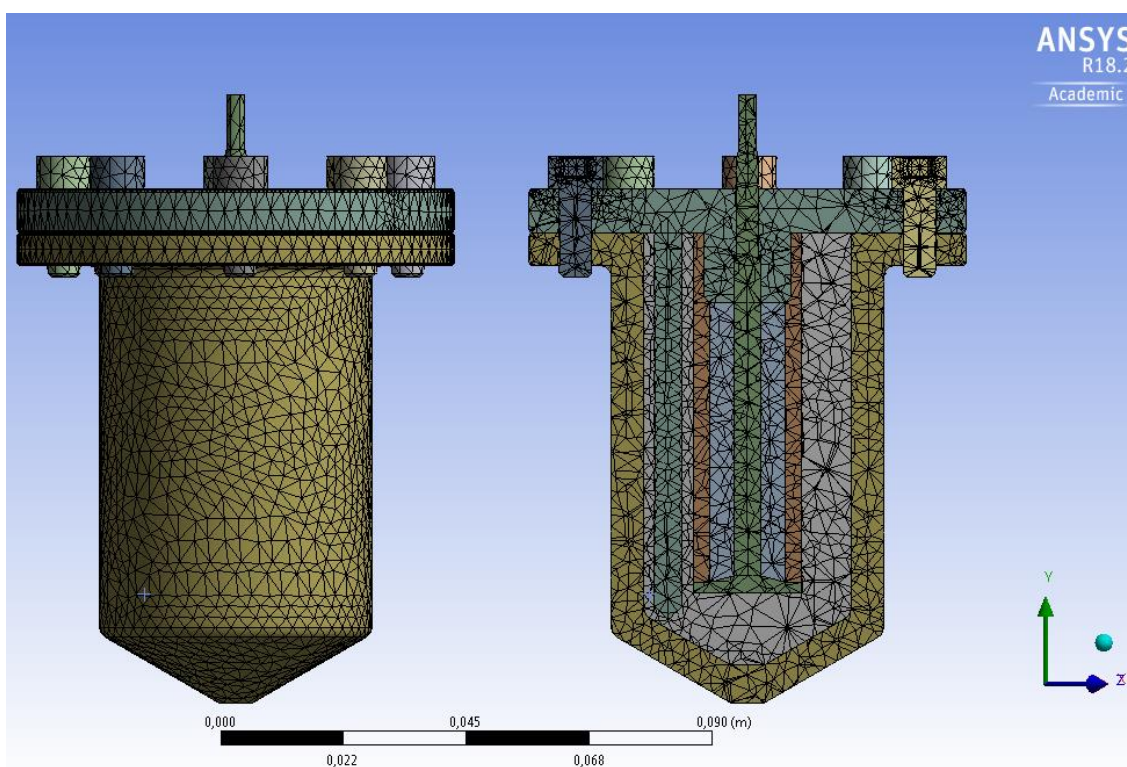


Figura 3.1 - Geometria utilizada nas análises de elementos finitos.

Pode-se observar também que os furos existentes na tampa do reator e no fundo do reservatório foram obstruídos nesta análise. Relativamente às propriedades de material, os componentes desenvolvidos neste projeto são fabricados a partir de aço inox 316, pelo que para estes foram consideradas as propriedades apresentadas na Tabela 2.3. No caso dos parafusos, foram utilizadas as propriedades do aço estrutural, sugeridas pela ferramenta ANSYS, mas com os valores das tensões de cedência e de rotura alterados para os valores característicos da Classe 8.8 dos parafusos, anteriormente apresentados no subcapítulo 2.4.6.

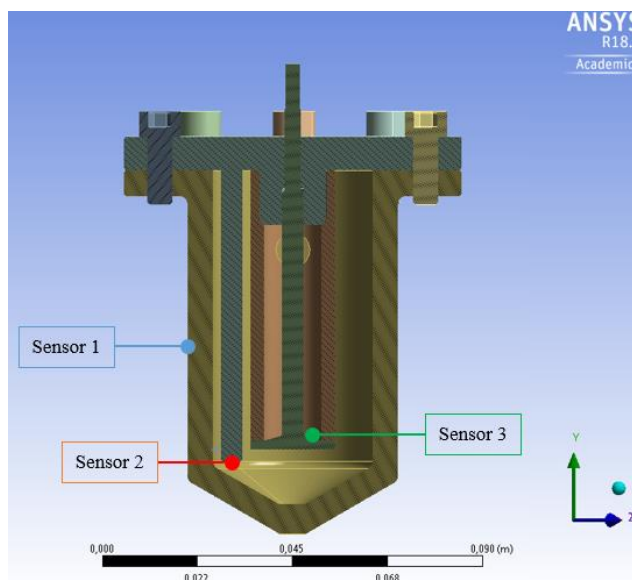
Relativamente à construção da malha de elementos finitos, foram em primeiro lugar estabelecidas as relações de contacto entre os elementos. No caso deste projeto utilizou-se contactos de fixação, para simular as diversas ligações roscadas existentes e contactos de fricção, para simular todas as superfícies de contacto onde existe atrito entre os elementos.

Neste trabalho, na análise térmica não havia necessidade recorrer à ferramenta ANSYS Fluent para estudar o comportamento do fluido no interior do reator. No entanto chegou-se à conclusão que para obter uma distribuição de temperatura coerente com a realidade, era necessário arranjar uma forma de simular também a transmissão de temperatura por convecção, que ocorre no ar existente no interior do reator. Desta forma, todo o espaço vazio existente no interior do reator foi preenchido por um volume (Figura 3.2). A este volume foram atribuídas as propriedades térmicas do material ar, sugeridas pelo programa. No entanto o programa tem atribuídas as propriedades mecânicas para este material. Para ser possível utilizar esta geometria posteriormente na análise estrutural, foi necessário atribuir um valor de Módulo de Young muito baixo (200 MPa) e um valor para o coeficiente de poisson. Finalmente foi criada uma malha de elementos finitos composta por tetraedros e com uma dimensão do elemento de 3 mm, que pode ser observada na seguinte figura.



*Figura 3.2 - Malha de elementos finitos utilizada para análises.*

Tendo a malha definida pode-se então passar à construção de cada uma das análises. Começando com a análise transiente térmica, esta tem como principal objetivo a determinação do tempo que demora a aquecer o interior do reator. Nesta foi considerada uma temperatura ambiente de 25 °C e foi também definido que todas as faces exteriores dos diversos componentes, à exceção das faces laterais do reservatório estão sujeitas a convecção natural, onde foi definido um coeficiente de transferência de calor de 10 W/m<sup>2</sup>°C. Para determinar o tempo de aquecimento é necessário simular o funcionamento do forno. Para o fazer foram, em primeiro lugar, colocados três sensores de temperatura na geometria do reator, com o objetivo de conhecer a temperatura em diferentes sítios da montagem ao longo do tempo. O primeiro sensor foi colocado na parede exterior do reservatório, com o objetivo de simular o termopar que regista a temperatura no interior do forno. O segundo foi colocado na extremidade da proteção do termopar, como forma de simular o sensor que mede a temperatura do reagente. Finalmente, o terceiro sensor foi introduzido no fundo do copo do reagente apenas como forma de obter uma leitura da temperatura nessa zona (Figura 3.3).



*Figura 3.3 - Localização dos sensores de temperatura utilizados na análise térmica transiente.*

Como foi referido no subcapítulo 2.4.2, o forno irá estar ligado a um controlador Eurotherm®. Este é responsável por garantir que as temperaturas registadas nos sensores 1 e 2 não ultrapassam os 500 °C e os 300 °C, respetivamente. Uma vez que não se conseguiu obter mais informação sobre este controlador foi assumido o seguinte funcionamento. Quando as temperaturas atingem os valores limite estabelecidos para cada sensor (1 e 2), o controlador irá desligar o forno de modo a que a temperatura volte a descer. Quando esta desce 50 °C no sensor 1 ou 1 °C no sensor 2, o forno volta a ser ligado à potência máxima. Este processo irá ser repetido até que a temperatura no interior do copo estabilize para valores próximos da temperatura de projeto. Desta forma foi obtido o seguinte funcionamento do forno, apresentado no gráfico da Figura 3.4.



Figura 3.4 - Gráfico com a representação do funcionamento do forno ao longo do tempo.

Do funcionamento apresentado na Figura 3.4 resultou seguinte distribuição de temperatura ao longo do tempo, registrada por cada um dos sensores (Figura 3.5).

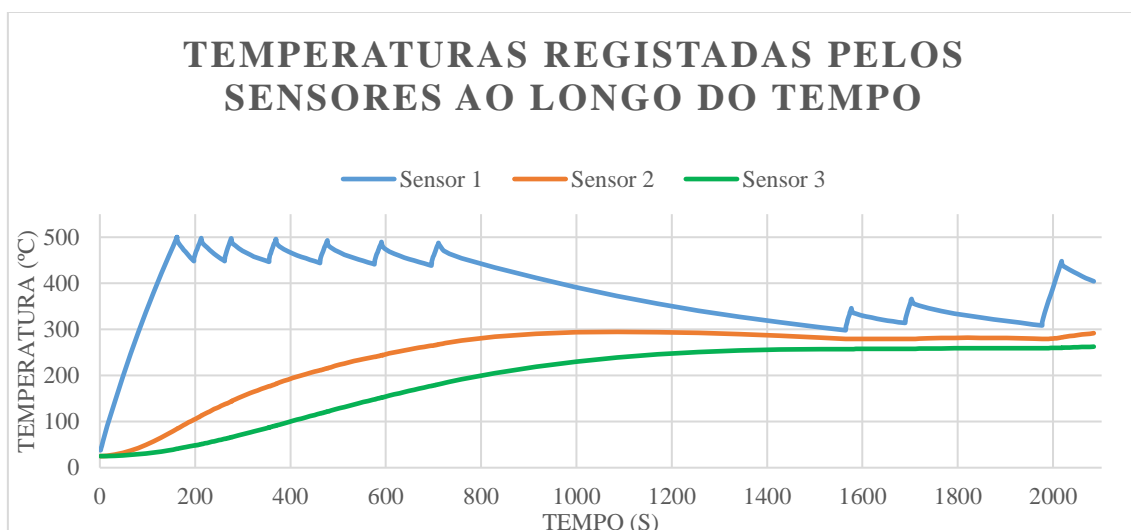


Figura 3.5 - Temperaturas registradas pelos sensores ao longo do tempo.

Como é possível observar na Figura 3.5, no sensor 1 que mede a temperatura do forno, esta não ultrapassa os 500 °C. Relativamente aos outros dois sensores, que nos permitem ter uma ideia da temperatura no interior do reator, é possível observar que as temperaturas atingem os 300 °C ao fim de 1000 segundos ( $\approx 17$  min). Pode-se também afirmar que ao fim de 1600 segundos ( $\approx 27$  min) as temperaturas homogeneízam no interior do reator, podendo nesta altura aplicar-se a pressão no interior do reator. Na Figura 3.6 é possível visualizar a variação da temperatura, nos diversos componentes do reator, ao longo do tempo.



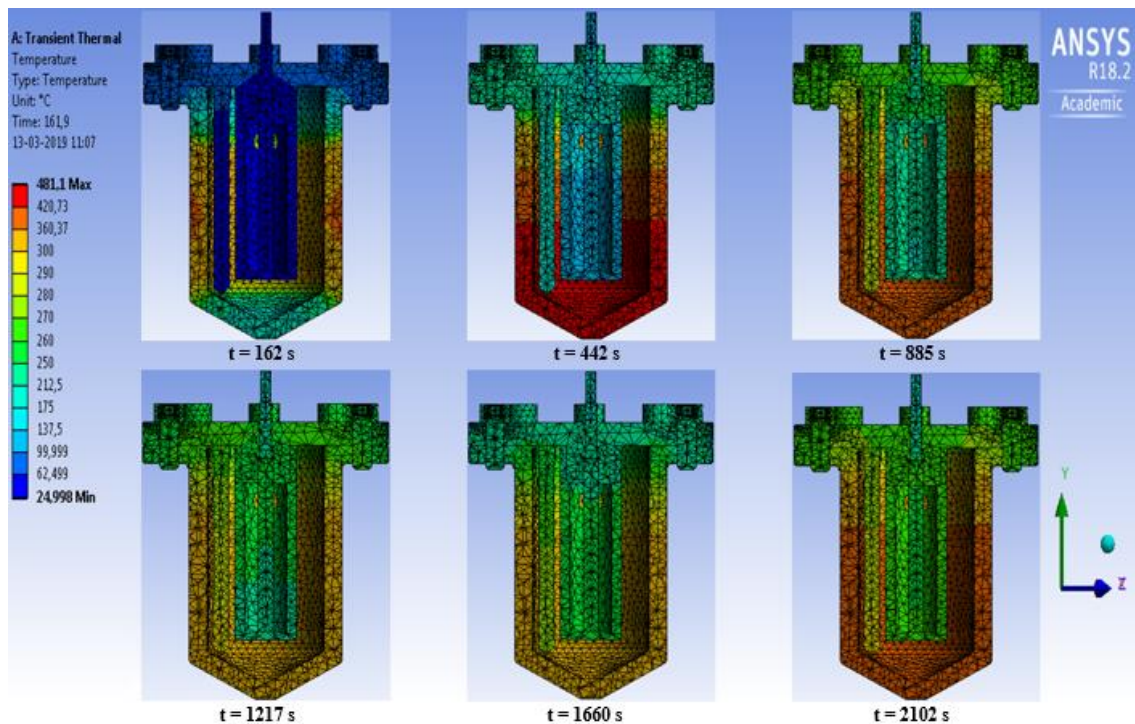


Figura 3.6 - Propagação da temperatura nos diversos componentes do reator ao longo do tempo.

Terminada esta análise é possível começar a análise estática estrutural. Para executar esta análise foi necessário em primeiro lugar definir as condições fronteira deste problema. Desta forma na face inferior da aba do reservatório foram constrangidos os movimentos na direção y (Figura 3.7). De seguida, no nó 1 foram constrangidos os movimentos nas direções x e z, para definir por completo o problema sem comprometer os resultados obtido, foram também constrangidos os movimentos na direção x no nó 2 (Figura 3.7).

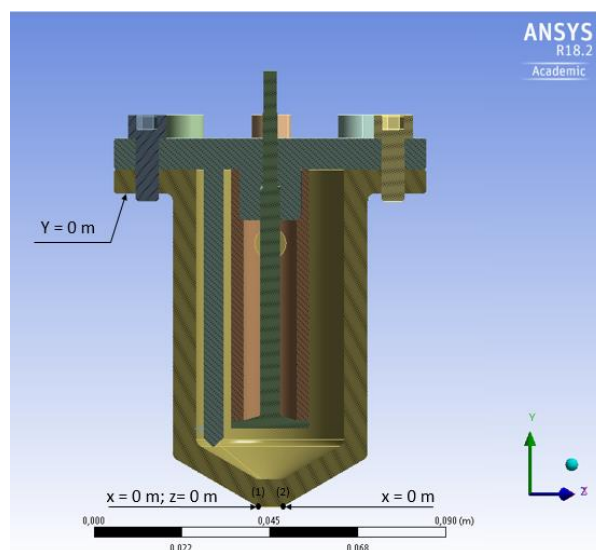


Figura 3.7 - Localização e direção dos constrangimentos considerados na análise estrutural.

Seguidamente, foi aplicada uma força de pré-carga, em cada um dos parafusos, de 3119 N e foi aplicada a pressão de projeto de 20 MPa nas faces dos diversos elementos que estão na zona interior do reator. Assim obtiveram-se as seguintes distribuições de tensões no reator apresentadas na Figura 3.8 e na Figura 3.9, quando aplicada a pré-carga e a pressão respetivamente.

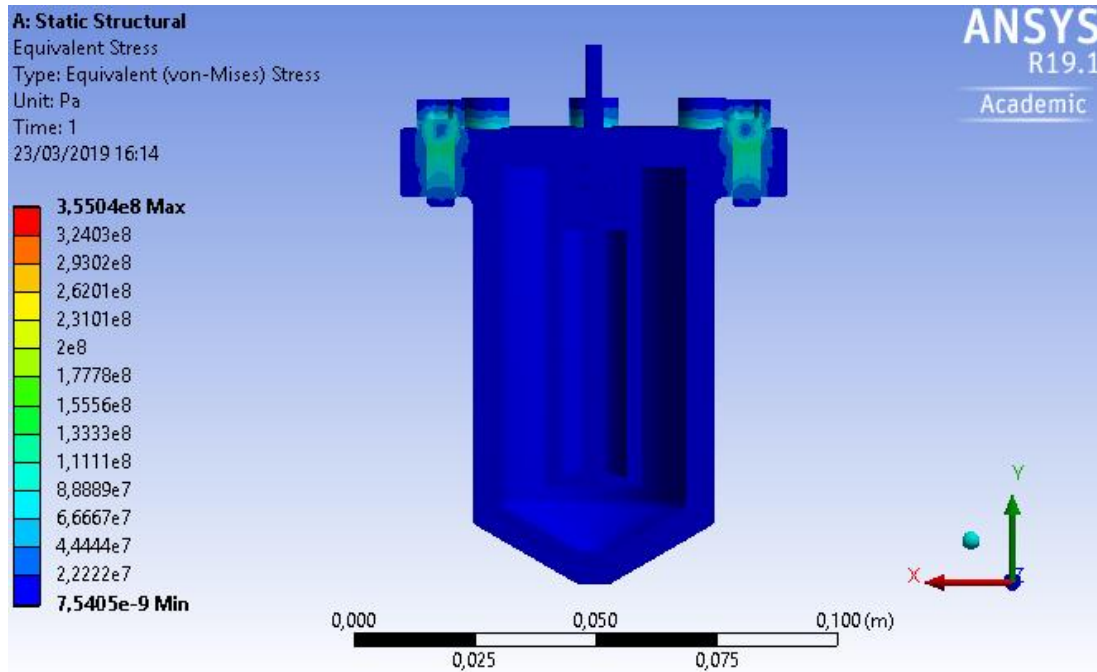


Figura 3.8 - Distribuição de tensões devido à força de pré-carga aplicada nos parafusos ( $T_{abm} = 25^{\circ}\text{C}$ ).

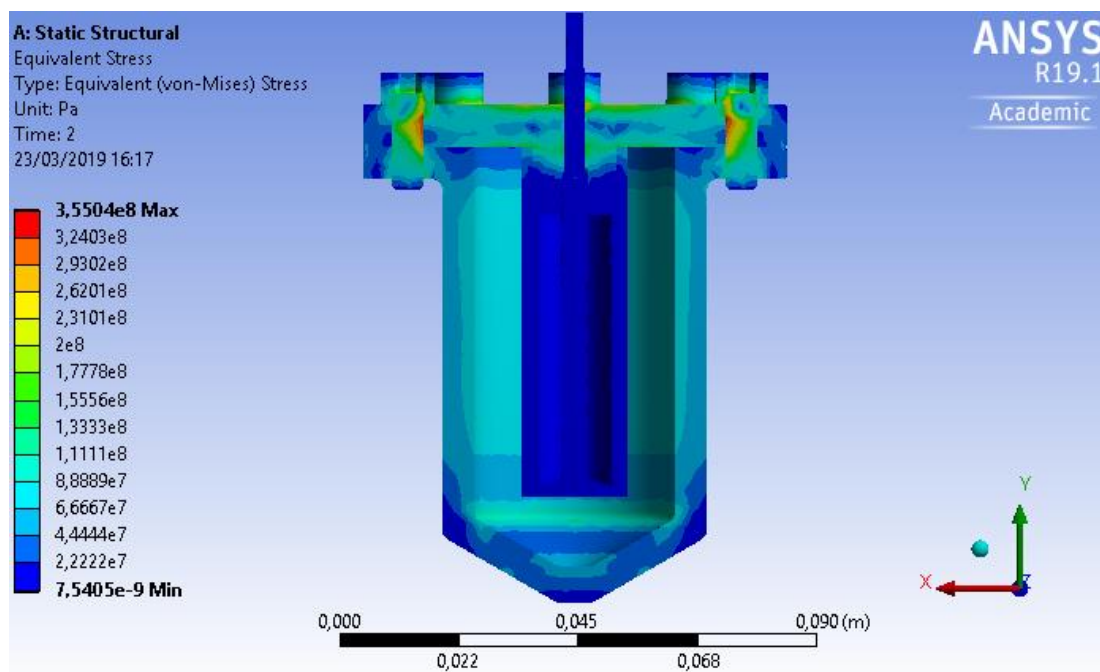


Figura 3.9 - Distribuição de tensões após a aplicação de pressão no interior do reator ( $T = 300^{\circ}\text{C}$ ).



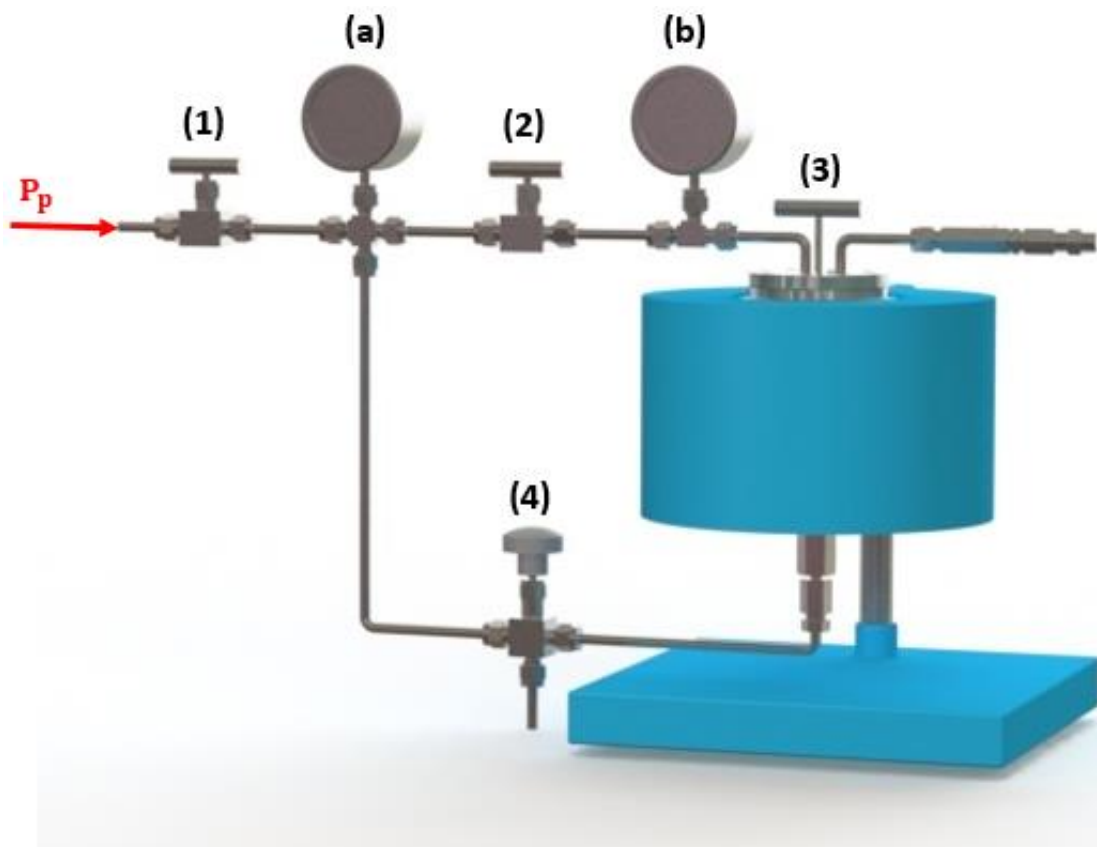
Das figuras acima apresentadas é possível concluir em primeiro lugar, que é possível apertar os parafusos com a força  $F_i$  determinada neste trabalho no subcapítulo 2.4.6. De seguida, é também possível verificar que todos os componentes são capazes de suportar os esforços que lhes são aplicados e ainda, que a tampa do reator é o elemento do reator que se encontra sujeito a tensões mais elevadas.

Numa fase seguinte teria interesse conciliar os dados obtidos relativamente ao aquecimento do reator com a análise estrutural anteriormente apresentada. Isto porque durante o aquecimento que irão ser produzidas tensões mais elevadas no reator, devido aos gradientes térmicos produzidos nos diversos componentes, característicos desta fase. Neste projeto ainda foi construída a análise transiente estrutural que iria permitir estudar o comportamento do reator durante a fase de aquecimento. No entanto essa análise revelou ser bastante complexa, pelo que não se obteve resultados interessantes para serem apresentados. Para ultrapassar este problema seria necessário alterar alguns parâmetros da análise.



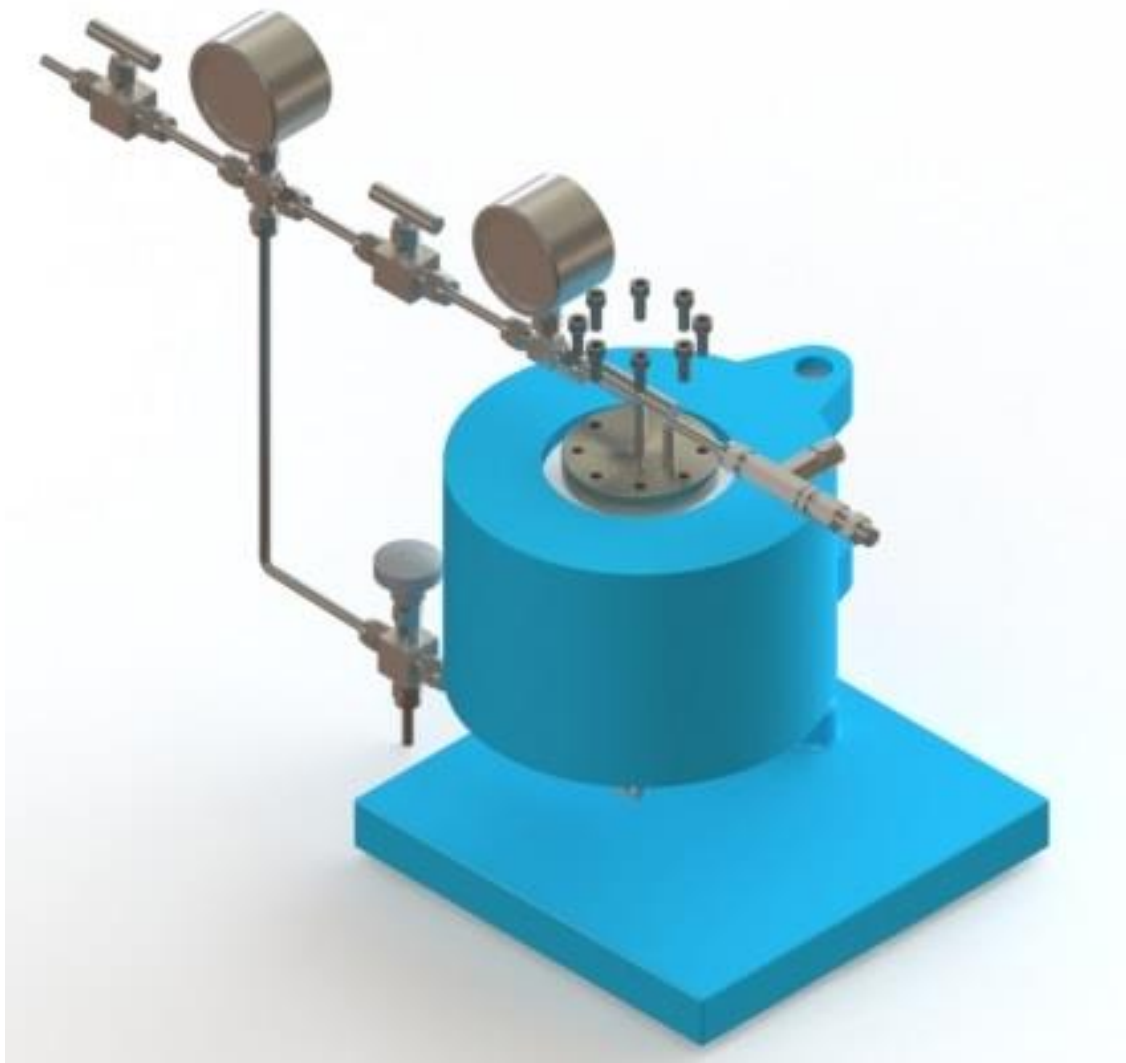
## Capítulo 4. Operação do equipamento

Neste capítulo pretende-se dar a conhecer ao leitor a sequência de processos que têm de ser executados, para o correto funcionamento deste equipamento ao longo de cada experiência. Desta forma, foi adotada a terminologia apresentada na Figura 4.1, como forma de identificar os diferentes componentes.



*Figura 4.1 - Montagem geral do equipamento; (1) e (2) válvula de agulha duas vias; (3) válvula de depósito; (4) válvula de agulha três vias; (a) e (b) manómetro analógico.*

No início de cada experiência o reator deverá estar inserido no interior do forno de acordo com a montagem final apresentada no subcapítulo 2.5, a sua tampa deverá estar aberta e todas as válvulas deveram estar fechadas. Numa primeira fase, é necessário introduzir os reagentes no interior do reator, para o fazer deve-se em primeiro lugar abrir a válvula da garrafa e de seguida, abrir a válvula (1) até se registar uma pressão de 20 MPa no manómetro (a). Quando atingido esse valor de pressão, a válvula (1) deve ser novamente fechada e os reagentes podem então ser inseridos nos respetivos locais no interior do reator, um deles no copo do reagente e outro no fundo do reservatório. De seguida, devem-se apertar os parafusos na aba do reservatório com um momento de aperto, anteriormente apresentado, de 1.864 Nm (Figura 4.2).



*Figura 4.2 - Montagem dos parafusos na tampa.*

Nesta fase é possível dar-se início à experiência, para o fazer deve-se ligar o forno e parametrizar no seu controlador a temperatura de projeto, que neste caso corresponde a 300 °C. Quando a temperatura tiver estabilizado no interior do forno, deve-se abrir as válvulas (1) e (2), controlando sempre o valor de pressão registado no manómetro (b), que mede a pressão no interior do reator. Quando este registar o valor de pressão pretendido para cada análise, a válvula (2) deve ser novamente fechada. É importante de referir que, para o correto funcionamento do equipamento, a pressão no interior do reator não pode ultrapassar os 19 MPa.

Uma vez impostas as condições de pressão e temperatura no interior do reator, pode-se abrir a válvula de depósito, que corresponde à válvula (3), dando assim início à reação. Quando se pretender terminar a reação e recolher o seu produto final, através de um processo de congelamento rápido, deve-se interromper a alimentação de pressão ao circuito fechando a válvula da garrafa e de seguida, deve-se abrir a válvula (4). Isto fará com que o produto de reação saia pela saída inferior da válvula para um copo que se encontra mergulhado em azoto líquido.

## Capítulo 5. Conclusão

---

No início deste documento foi proposto, como principal objetivo deste trabalho, a concretização do projeto de detalhe de um equipamento de laboratório que permitisse o estudo de reações num ambiente controlado de pressão e temperatura. Para atingir esse objetivo, foi realizada uma pesquisa sobre este tipo de equipamentos, de modo a criar algum conhecimento relativamente a principais características e a componentes que sejam necessários integrar. Após esta pesquisa, foi possível identificar que seria necessário conceber um reator, capaz de suportar a pressão de projeto de 200 bar e as temperaturas elevadas cerca de 300 °C. Neste reator devem ser incorporados três sistemas de modo a controlar a pressão, no seu interior e no circuito de fluido; a temperatura a que se dá a reação e ainda; a altura em que esta tem início.

Numa primeira fase foi possível obter a geometria de cada um dos componentes do reator, identificar todos os elementos que compõem os sistemas de pressão e temperatura e ainda, conceber todas as ligações dos diversos sistemas. Foram tomados todos os cuidados necessários para garantir a estanquidade do equipamento e finalmente foi apresentada a sua montagem.

De seguida, foram realizadas duas análises de elementos finitos nas quais foi possível, numa primeira fase, estimar o tempo necessário para aquecer o interior do reator, tendo por base algumas considerações que foram tomadas relativamente ao funcionamento do forno. Desta forma, foi obtido um tempo de aquecimento de aproximadamente 27 min. É importante referir que dadas essas considerações, é provável que o tempo estimado possa ser superior à realidade. Posteriormente foi também possível com estas análises, confirmar a integridade do reator quando sujeito aos diversos esforços que lhe são aplicados. Sejam estes os esforços produzidos pela pressão aplicada no seu interior, ou os esforços aplicados na aba do reservatório e na tampa devido à ligação aparafusada que mantém o reator fechado durante o funcionamento do equipamento. Ficando apenas a faltar confirmar o comportamento do reator durante a fase de aquecimento.

Numa fase seguinte, que já não houve oportunidade de realizar neste projeto, seria necessário conceber/adquirir os componentes apresentados neste trabalho e efetuar a montagem do equipamento no laboratório onde este irá ser utilizado. Nesta fase é provável que haja a necessidade de executar algumas alterações no sistema de pressão, de modo a ajustar-se às condições do laboratório. Se assim for deve-se ter o cuidado de respeitar a posição relativa entre os componentes, bem como a sua posição de funcionamento.

Finalmente, o equipamento deve passar por alguns testes a fim de verificar algumas características importantes como a estanquidade do equipamento; o funcionamento dos aparelhos de medição de pressão e temperatura; o funcionamento da válvula de retenção incorporada no fundo do reservatório e a capacidade de abertura da tampa do reator.



## Bibliografia

- [1] C. R. German and K. L. Von Damm, “The oceans and marine geochemistry,” in *Treatise on Geochemistry*, vol. 6, H. D. Holland and K. K. Turekian, Eds. 2003, pp. 181–222.
- [2] B. T. Phillips, “Beyond the vent: New perspectives on hydrothermal plumes and pelagic biology,” *Deep. Res. Part II Top. Stud. Oceanogr.*, vol. 137, pp. 480–485, 2017.
- [3] “Hydrothermal vents formation.” [Online]. Available: [https://microbewiki.kenyon.edu/index.php/File:Vent\\_101.jpg](https://microbewiki.kenyon.edu/index.php/File:Vent_101.jpg). [Accessed: 30-Jan-2018].
- [4] “Technology Overview.” [Online]. Available: <http://www.nautilusminerals.com/irm/content/technology-overview.aspx?RID=329>. [Accessed: 30-Jan-2018].
- [5] W. Brazelton, “Hydrothermal vents,” *Current Biology*, vol. 27, no. 11, pp. R450–R452, 2017.
- [6] K. Honarmand Ebrahimi, P. L. Hagedoorn, and W. R. Hagen, “Unity in the biochemistry of the iron-storage proteins ferritin and bacterioferritin,” *Chemical Reviews*, vol. 115, no. 1, pp. 295–326, 2015.
- [7] C. A. Butts *et al.*, “Directing noble metal ion chemistry within a designed ferritin protein,” *Biochemistry*, vol. 47, no. 48, pp. 12729–12739, 2008.
- [8] “Definição Autoclave.” [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Autoclave>. [Accessed: 11-Jul-2018].
- [9] “Catálogo AmAr.” [Online]. Available: <https://www.amarequip.com/pdf/High-Pressure-Autoclaves-Reactors.pdf>. [Accessed: 31-Jan-2018].
- [10] “Catálogo Buchiglasuster.” [Online]. Available: [https://www.buchiglas.pt/fileadmin/buchiglas\\_international/download/dvs/Brochures\\_and\\_Flyers/A\\_High\\_Pressure\\_Reactor\\_midiclave.pdf](https://www.buchiglas.pt/fileadmin/buchiglas_international/download/dvs/Brochures_and_Flyers/A_High_Pressure_Reactor_midiclave.pdf). [Accessed: 31-Jan-2018].
- [11] “Catálogo Nano-mag Technologies.” [Online]. Available: <http://www.nanomagtech.com/pdf/download.pdf>. [Accessed: 31-Jan-2018].
- [12] “Catálogo Labocon.” [Online]. Available: <http://labocon.com/catalog/laboratory-autoclave.pdf>. [Accessed: 31-Jan-2018].
- [13] “Catálogo Tuttnauer.” [Online]. Available: [https://tuttnauer.com/sites/default/files/brochures/lab-dline-en-autoclave-tuttnauer-16-11-15\\_2.pdf](https://tuttnauer.com/sites/default/files/brochures/lab-dline-en-autoclave-tuttnauer-16-11-15_2.pdf). [Accessed: 31-Jan-2018].
- [14] “Catálogo Priorclave.” [Online]. Available: <https://priorclavena.com/wp-content/uploads/2016/03/Priorclave-40L-Benchtop-Technical-Data-Sheet.pdf>. [Accessed: 31-Jan-2018].
- [15] “Válvula solenoide.” [Online]. Available: [www.burkert.com/en/type/2400?category=1\\_6](http://www.burkert.com/en/type/2400?category=1_6). [Accessed: 19-Mar-2018].
- [16] “Exemplos de sensores Termopar.” [Online]. Available: [http://vertex-tw.com/en/web/Products\\_2.php?key=1](http://vertex-tw.com/en/web/Products_2.php?key=1). [Accessed: 22-Mar-2018].
- [17] “Catálogo de resitências elétricas.” [Online]. Available: <http://issuu.com/nibegroup/docs/hotwatt-2010-catalog?e=30789445/53966569>. [Accessed: 19-Mar-2018].

- [18] “Swagelok tube fitting FK Series.” [Online]. Available: <https://www.swagelok.com/downloads/webcatalogs/en/MS-02-472.pdf#page=86>. [Accessed: 11-Sep-2018].
- [19] R. Aços, “Propriedades Aço Inox 316 - Ramada Aços.” [Online]. Available: [https://www.ramada.pt/pt/produtos/acos/aa-os-inoxida-al-veis-e-refracta-al-rios/r-316\\_.html](https://www.ramada.pt/pt/produtos/acos/aa-os-inoxida-al-veis-e-refracta-al-rios/r-316_.html). [Accessed: 10-Sep-2018].
- [20] L. V. da Cunha, *Desenho Técnico*, 15ª. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2010.
- [21] R. G. B. J. K. Nisbett, *Shigley's Mechanical Engineering Design*, 10ª. New Yourk: McGraw-Hill Education, 2015.
- [22] Epidor, “Catálogo de Juntas Tóricas - EPIDOR.” [Online]. Available: <https://epidor.com/catalogos-td/>. [Accessed: 22-May-2018].
- [23] M. Seals, “Catálogo Monroe Seals: O-Ring 4X2 KALREZ-90.” [Online]. Available: <https://catalog.monroeseals.com/item/metric-o-rings-1/metric-perfluoroelastomer-o-rings-1/4-x-2-kalrez-90>. [Accessed: 24-May-2018].
- [24] Swagelok, “Stainless Steel Seamless Tubing and Tube Support Systems.” [Online]. Available: <https://www.swagelok.com/downloads/webcatalogs/en/MS-01-181.pdf>. [Accessed: 11-Sep-2018].
- [25] Swagelok, “Meduim and High-Pressure Fittings , Tubing and Accessories.” [Online]. Available: <https://www.swagelok.com/downloads/webcatalogs/en/MS-02-472.pdf#page=86>. [Accessed: 11-Sep-2018].
- [26] Swagelok, “Pressure Gauges - Industrial and Process.” [Online]. Available: <https://www.swagelok.com/downloads/webcatalogs/en/MS-02-170.pdf>. [Accessed: 12-Sep-2018].
- [27] Swagelok, “Integral - Bonnet Needle Valves.” [Online]. Available: <https://www.swagelok.com/downloads/webcatalogs/en/MS-01-164.pdf>. [Accessed: 12-Sep-2018].
- [28] Swagelok, “Proportional Relief Valves.” [Online]. Available: <https://www.swagelok.com/downloads/webcatalogs/en/MS-01-141.pdf>. [Accessed: 14-Sep-2018].
- [29] M. Seals, “Catálogo Monroe Seals: O-Ring 44X3 KALREZ-90.” [Online]. Available: <https://catalog.monroeseals.com/item/metric-o-rings-1/metric-perfluoroelastomer-o-rings-1/44-x-3-kalrez-90>. [Accessed: 25-May-2018].
- [30] Intec, “Intec - Parafusaria e fixações.” [Online]. Available: [http://www.intec.pt/fotos/gca/catalogo\\_tecnico\\_intec\\_1363278316.pdf](http://www.intec.pt/fotos/gca/catalogo_tecnico_intec_1363278316.pdf). [Accessed: 30-May-2018].



## **Anexos**




Anexo 1

Swagelok

3/23/2019 1:14:45 PM  
www.swagelok.com

### 304/304L and 316/316L Seamless, Instrumentation Grade Tubing





Part No.  
SS-T4-S-035-6ME

Part Description  
316/316L Stainless Steel Seamless Tubing, 1/4 in. OD x 0.035 in. Wall x 6 Meters  
(Priced and ordered per meter; order in 6 meter increments)

### Specifications


General	
Body Material	Stainless Steel
eClass (8.0)	37029000
Tube OD	1/4 in.
Tube Wall Thickness	0.035 in.
UN SP 8C (11.0501)	31231319
UN SP 8C (4.03)	40141818
UN SP 8C (PGE)	401716AJ

 The complete catalog contents must be reviewed to ensure that the system designer and user make a safe product selection. When selecting products, the total system design must be considered to ensure safe, trouble-free performance. Function, material compatibility, adequate ratings, proper installation, operation, and maintenance are the responsibilities of the system designer and user.

 Caution: Do not mix or interchange valve components with those of other manufacturers.


2019 Copyright Swagelok Company

## Anexo 2



3/23/2019 1:24:46 PM  
[www.swagelok.com](http://www.swagelok.com)

### Integral Bonnet Needle Valves




**Part No.**  
SS-20VS4

**Part Description**  
Stainless Steel Integral Bonnet Needle Valve, 0.21 Cv, 1/4 in. Swagelok Tube Fitting, Vee Stem

### Specifications


General	
Body Material	316 Stainless Steel
Cleaning Process	Standard Cleaning and Packaging (SC-10)
Connection 1 Size	1/4 in.
Connection 1 Type	Swagelok® Tube Fitting
Connection 2 Size	1/4 in.
Connection 2 Type	Swagelok® Tube Fitting
eClass (4.1)	37010201
eClass (5.1.4)	37010201
eClass (8.0)	37010203
eClass (8.1)	37010203
Flow Pattern	Straight (2-way)
Handle Color	Not Applicable
Handle Style	Stainless Steel Bar
Lubricant	Perf. Polyether/Tung. Disulfide (WL7)
Max Temperature with Pressure Rating	450°F @ 4130 PSIG /232°C @ 284 BAR
Orifice	0.125 in /3.2 mm
Packing	PFA
Room Temperature Pressure Rating	6000 PSIG @ 100°F /413 BAR @ 37°C
Stem Tip Material	316 Stainless Steel
Stem Type	Vee
UNSP3C (10.0)	40141602
UNSP3C (11.0501)	40141602
UNSP3C (13.0801)	40141602
UNSP3C (15.1)	40141602
UNSP3C (17.1001)	40141600
UNSP3C (4.03)	40141602
UNSP3C (PGE)	401416AL
UNSP3C (8EQIRU3)	M4170
UNSP3C (8WG01)	40141602

## Anexo 3



3/23/2019 1:32:39 PM  
[www.swagelok.com](http://www.swagelok.com)

### Toggle Valves



Part No.  
**SS-1VS4-X**

Part Description  
Stainless Steel Integral Bonnet Cross Pattern Needle Valve, 1/4 in. Swagelok Tube Fitting, Vee Stem

### Specifications


General	
Body Material	316 Stainless Steel
Cleaning Process	Standard Cleaning and Packaging (SC-10)
Connection 1 Size	1/4 in.
Connection 1 Type	Swagelok® Tube Fitting
Connection 2 Size	1/4 in.
Connection 2 Type	Swagelok® Tube Fitting
Connection 3 Size	1/4 in.
Connection 3 Type	Swagelok® Tube Fitting
eClass (4.1)	37010201
eClass (5.1.4)	37010201
eClass (8.0)	37010203
eClass (8.1)	37010203
Feature	Cross Pattern
Flow Pattern	Cross Pattern (3-way)
Handle Color	Black
Handle Style	Phenolic Knob
Lubricant	Perf. Polyether/Tung. Disulfide (WL7)
Max Temperature with Pressure Rating	450°F @ 3435 PSIG /232°C @ 236 BAR
Orifice	0.172 in
Packing	PFA
Room Temperature Pressure Rating	5000 PSIG @ 100°F /344 BAR @ 37°C
Stem Tip Material	316 Stainless Steel
Stem Type	Vee
UN SP 8C (10.0)	40141638
UN SP 8C (11.0601)	40141638
UN SP 8C (13.0601)	40141638
UN SP 8C (15.1)	40141638
UN SP 8C (17.1001)	40141600
UN SP 8C (4.03)	40141602
UN SP 8C (PGE)	401416AL
UN SP 8C (SWG01)	40141602
Valve Material	Stainless Steel

**i** The complete catalog contents must be reviewed to ensure that the system designer and user make a safe product selection. When selecting products, the total system design must be considered to ensure safe, trouble-free performance. Function, material compatibility, adequate ratings, proper installation, operation, and maintenance are the responsibilities of the system designer and user.

**⚠** Caution: Do not mix or interchange valve components with those of other manufacturers.


©2019 Copyright Swagelok Company

Anexo 4



3/23/2019 1:25:46 PM  
www.swagelok.com

### Proportional Relief Valves, High Pressure





Part No.  
SS-4R3A-NE

Part Description  
Stainless Steel High Pressure Proportional Relief Valve, 1/4 in. Swagelok Tube Fitting, Neoprene Seal

### Specifications


General	
Body Material	316 Stainless Steel
Cleaning Process	Standard Cleaning and Packaging (SC-10)
Connection 1 Size	1/4 in.
Connection 1 Type	Swagelok® Tube Fitting
Connection 2 Size	1/4 in.
Connection 2 Type	Swagelok® Tube Fitting
eClass (4.1)	37010901
eClass (5.1.4)	37019901
eClass (6.0)	37019901
eClass (6.1)	37019901
UN SP 8C (10.0)	40141606
UN SP 8C (11.0601)	40141606
UN SP 8C (13.0601)	40141606
UN SP 8C (16.1)	40141606
UN SP 8C (4.03)	40141718
UN SP 8C (PGE)	401416AL
UN SP 8C (3WG01)	40141718

 The complete catalog contents must be reviewed to ensure that the system designer and user make a safe product selection. When selecting products, the total system design must be considered to ensure safe, trouble-free performance. Function, material compatibility, adequate ratings, proper installation, operation, and maintenance are the responsibilities of the system designer and user.

 Caution: Do not mix or interchange valve components with those of other manufacturers.


2019 Copyright Swagelok Company

## Anexo 5



3/23/2019 1:18:08 PM  
[www.swagelok.com](http://www.swagelok.com)

### Medium Pressure Tube Fittings





Part No.  
SS-4FKD-3

Part Description  
316 Stainless Steel Swagelok Medium Pressure Tube Fitting, Union Tee, 1/4 in. Tube OD

### Specifications

General	
Body Material	316 Stainless Steel
Cleaning Process	Standard Cleaning and Packaging (SC-10)
Configuration	Tee
Connection 1 Size	1/4 in.
Connection 1 Type	Swagelok® Medium-Pressure Tube Fitting
Connection 2 Size	1/4 in.
Connection 2 Type	Swagelok® Medium-Pressure Tube Fitting
Connection 3 Size	1/4 in.
Connection 3 Type	Swagelok® Medium-Pressure Tube Fitting
eClass (4.1)	37020716
eClass (5.1.4)	37020690
eClass (8.0)	37020690
eClass (8.1)	37020690
UN SP 8C (10.0)	40142600
UN SP 8C (11.0601)	40142600
UN SP 8C (13.0801)	40183100
UN SP 8C (15.1)	40183100
UN SP 8C (4.03)	40141700
UN SP 8C (PGE)	401753AN
UN SP 8C (SEQUIRU 8)	M4170
UN SP 8C (SWG01)	40141700

 The complete catalog contents must be reviewed to ensure that the system designer and user make a safe product selection. When selecting products, the total system design must be considered to ensure safe, trouble-free performance. Function, material compatibility, adequate ratings, proper installation, operation, and maintenance are the responsibilities of the system designer and user.

 **Caution:** Do not mix or interchange valve components with those of other manufacturers.


2019 Copyright Swagelok Company

Anexo 6

Swagelok

3/23/2019 1:18:26 PM  
www.swagelok.com

### Medium Pressure Tube Fittings





Part No.  
SS-4FKD-4

Part Description  
316 Stainless Steel Swagelok Medium Pressure Tube Fitting, Union Cross, 1/4 in. Tube OD

### Specifications

General	
Body Material	316 Stainless Steel
Cleaning Process	Standard Cleaning and Packaging (SC-10)
Configuration	Cross
Connection 1 Size	1/4 in.
Connection 1 Type	Swagelok® Medium-Pressure Tube Fitting
Connection 2 Size	1/4 in.
Connection 2 Type	Swagelok® Medium-Pressure Tube Fitting
Connection 3 Size	1/4 in.
Connection 3 Type	Swagelok® Medium-Pressure Tube Fitting
Connection 4 Size	1/4 in.
Connection 4 Type	Swagelok® Medium-Pressure Tube Fitting


 The complete catalog contents must be reviewed to ensure that the system designer and user make a safe product selection. When selecting products, the total system design must be considered to ensure safe, trouble-free performance. Function, material compatibility, adequate ratings, proper installation, operation, and maintenance are the responsibilities of the system designer and user.

 **Caution:** Do not mix or interchange valve components with those of other manufacturers.

2018 Copyright Swagelok Company




# Anexo 7



3/23/2019 1:31:48 PM  
www.swagelok.com

## Medium Pressure Tube Fittings





Part No.  
SS-4FK0-1-4

Part Description  
316 Stainless Steel Swagelok Medium Pressure Tube Fitting, Male Connector, 1/4 in. Tube OD x 1/4 in. Male NPT

## Specifications

General	
Body Material	316 Stainless Steel
Cleaning Process	Standard Cleaning and Packaging (SC-10)
Configuration	Male Connector
Connection 1 Size	1/4 in.
Connection 1 Type	Swagelok® Medium-Pressure Tube Fitting
Connection 2 Size	1/4 in.
Connection 2 Type	Male NPT
aClass (4.1)	37030703
aClass (5.1.4)	37020590
aClass (6.0)	37020590
aClass (6.1)	37020590
UN8P3C (10.0)	40142600
UN8P3C (11.0601)	40142600
UN8P3C (13.0601)	40183100
UN8P3C (15.1)	40183100
UN8P3C (4.03)	40141700
UN8P3C (PGE)	401753AN
UN8P3C (3EGIRU8)	M4170
UN8P3C (3WG01)	40141700

 The complete catalog contents must be reviewed to ensure that the system designer and user make a safe product selection. When selecting products, the total system design must be considered to ensure safe, trouble-free performance. Function, material compatibility, adequate ratings, proper installation, operation, and maintenance are the responsibilities of the system designer and user.

 Caution: Do not mix or interchange valve components with those of other manufacturers.

2019 Copyright Swagelok Company

Anexo 8



**Monroe Seals**  
11128 James St.  
Zeeland, MI 49464, USA  
**Tel:** 877.740.0349  
**Fax:** 800.453.9683  
**Email:** [info@monroeseals.com](mailto:info@monroeseals.com)  
**Website:** [www.monroeseals.com](http://www.monroeseals.com)

[PRINT](#) [BACK](#)

[All Categories](#) > [O-Rings](#) > [Metric O-Rings](#) > [Metric Perfluoroelastomer O-Rings](#) > Item # 4 X 2 KALREZ-90

ITEM # 4 X 2 KALREZ-90, METRIC PERFLUOROELASTOMER O-RINGS

Metric O-Rings are employed in specialized applications and, like the name suggests, are standardized by metric dimensions. With a wide variety of sizes available, Metric O-Rings fill in the gaps left by the standardized AS568 o-ring chart. Metric O-Ring sizing is determined by the o-ring's inside diameter and cross section width. Perfluoroelastomer is also known as FKM and Perflora.

Parts resist over 1,800 different chemicals, while offering the high temperature stability of PTFE (327°C). They're used in aggressive chemical processing, pharmaceutical, oil recovery, gas recovery, and aerospace applications. The proven, long-term performance of Kalrez® parts can mean less repairs, seal changes, inspections and equipment uptime for greater productivity and yield.



Specifications

Inside Diameter	4.00 mm
Cross Section Width	2.00 mm
Durometer	90
Type	Metric Standard O-Ring
Material	Perfluoroelastomer

# Anexo 9



**Monroe Seals**  
11128 James St.  
Zeeland, MI 49464, USA  
Tel: 877.740.0349  
Fax: 800.453.9883  
Email: [info@monroeseals.com](mailto:info@monroeseals.com)  
Website: [www.monroeseals.com](http://www.monroeseals.com)

[PRINT](#) [BACK](#)

[All Categories](#) > [O-Rings](#) > [Metric O-Rings](#) > [Metric Perfluoroelastomer O-Rings](#) > Item # 44 X 3 KALREZ-90

## ITEM # 44 X 3 KALREZ-90, METRIC PERFLUOROELASTOMER O-RINGS

Metric O-Rings are employed in specialized applications and, like the name suggests, are standardized by metric dimensions. With a wide variety of sizes available, Metric O-Rings fill in the gaps left by the standardized AS568 o-ring chart. Metric O-Ring sizing is determined by the o-ring's inside diameter and cross section width. Perfluoroelastomer is also known as FKM and Perfloro.

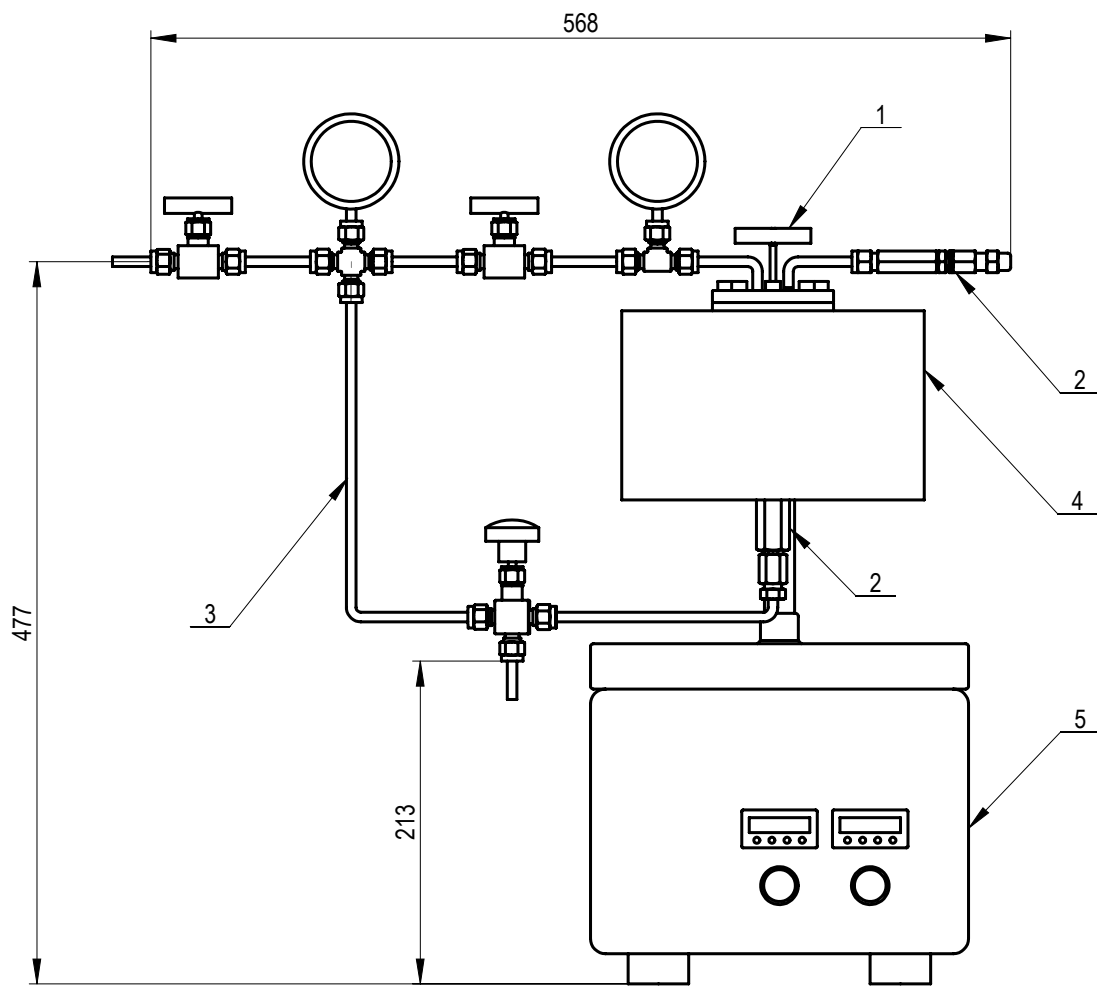
Parts resist over 1,800 different chemicals, while offering the high temperature stability of PTFE (327°C). They're used in aggressive chemical processing, pharmaceutical, oil roovery, gas recovery, and aerospace applications. The proven, long-term performance of Kalrez® parts can mean less repairs, seal changes, inspections and equipment uptime for greater productivity and yield.



### Specifications

<b>Inside Diamter</b>	44.00 mm
<b>Cross Section Width</b>	3.00 mm
<b>Durometer</b>	90
<b>Type</b>	Metric Standard O-Ring
<b>Material</b>	Perfluoroelastomer

## Apêndice

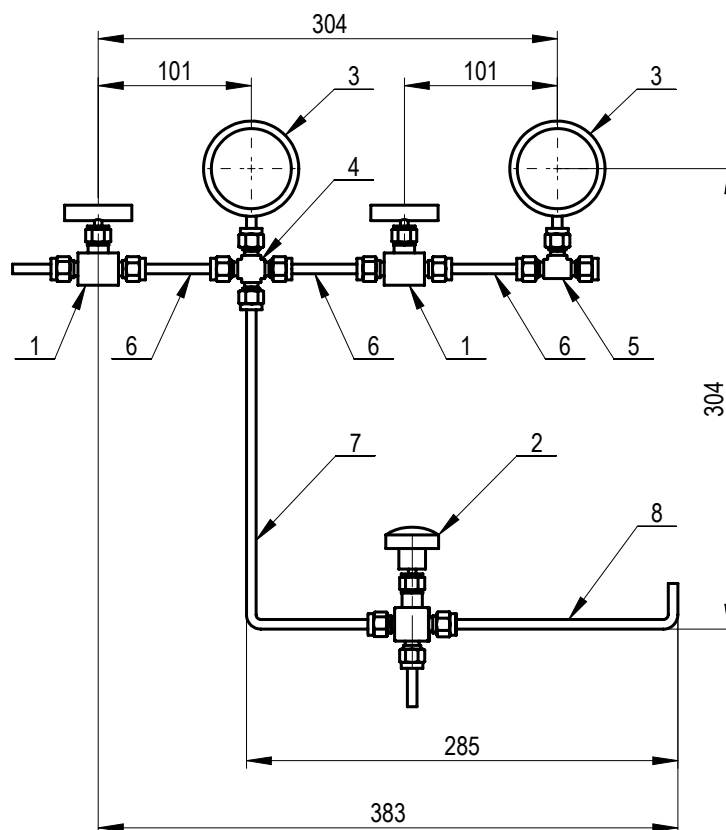


1	Controlador de temperatura			5			
1	Forno elétrico			3			
1	Sistema de alimentação de pressão	Desenho 4		4			
1	Válvulas de controlo da pressão no interior do reator	Desenho 3		5			
1	Reator	Desenho 2		1			

Nº	DESIGNAÇÃO	Nº DA NORMA Nº DO DESENHO	MATERIAL	Nº REF.	PRODUTO SEMI ACABADO Nº DO MOLDE    Nº DA MATRIZ	PESO	OBSERVAÇÕES
----	------------	------------------------------	----------	------------	---	------	-------------

Observações:	1:5  Toleran. ISO 2768	<b>Montagem do equipamento</b>	Desenho 1
--------------	------------------------------------	--------------------------------	-----------

Proj.			<i>Equipamento de laboratório para estudo de reações bioquímicas</i>	F.C.T.-U.N.L <i>Dissertação em Engenharia Mecânica</i>		
Des.	13/03/2019	Pedro Cabral				
Copiou						
Visto						

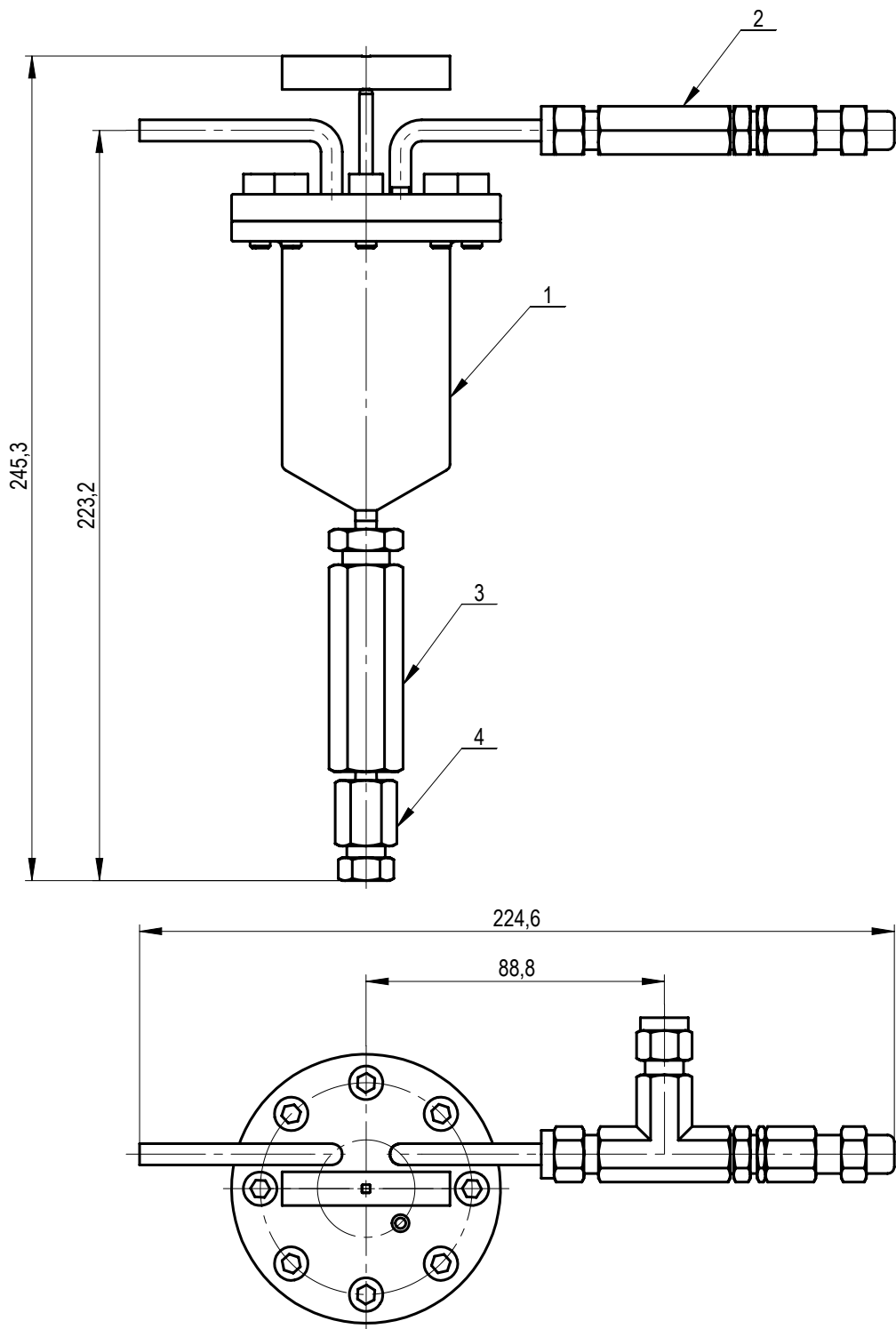


1	Tubo de ligação ao adaptador macho	Desenho 15	Aço Inox 316	8			
1	Tubo de ligação à válvula de 3 vias	Desenho 14	Aço Inox 316	7			
3	Tubo de ligação à válvula de 2 vias	Desenho 13	Aço Inox 316	6			
1	União em T	SS-4FK0-3	Aço Inox 316	5			
1	União em cruz	SS-4FK0-4	Aço Inox 316	4			
2	Manómetro	PGI-63S-LG25-LAGX	Aço Inox 316	3			
1	Válvula de agulha 3 vias	SS-20VS4	Aço Inox 316	2			
2	Válvula de agulha 2 vias	SS-20VS4-X	Aço Inox 316	1			

Nº	DESIGNAÇÃO	Nº DA NORMA Nº DO DESENHO	MATERIAL	Nº REF.	PRODUTO SEMI ACABADO Nº DO MOLDE Nº DA MATRIZ	PESO	OBSERVAÇÕES
----	------------	------------------------------	----------	---------	--	------	-------------

Observações:	1:5	<i>Montagem do sistema de alimentação de pressão</i>	Desenho 2				
	Toleran.						
	ISO 2768						

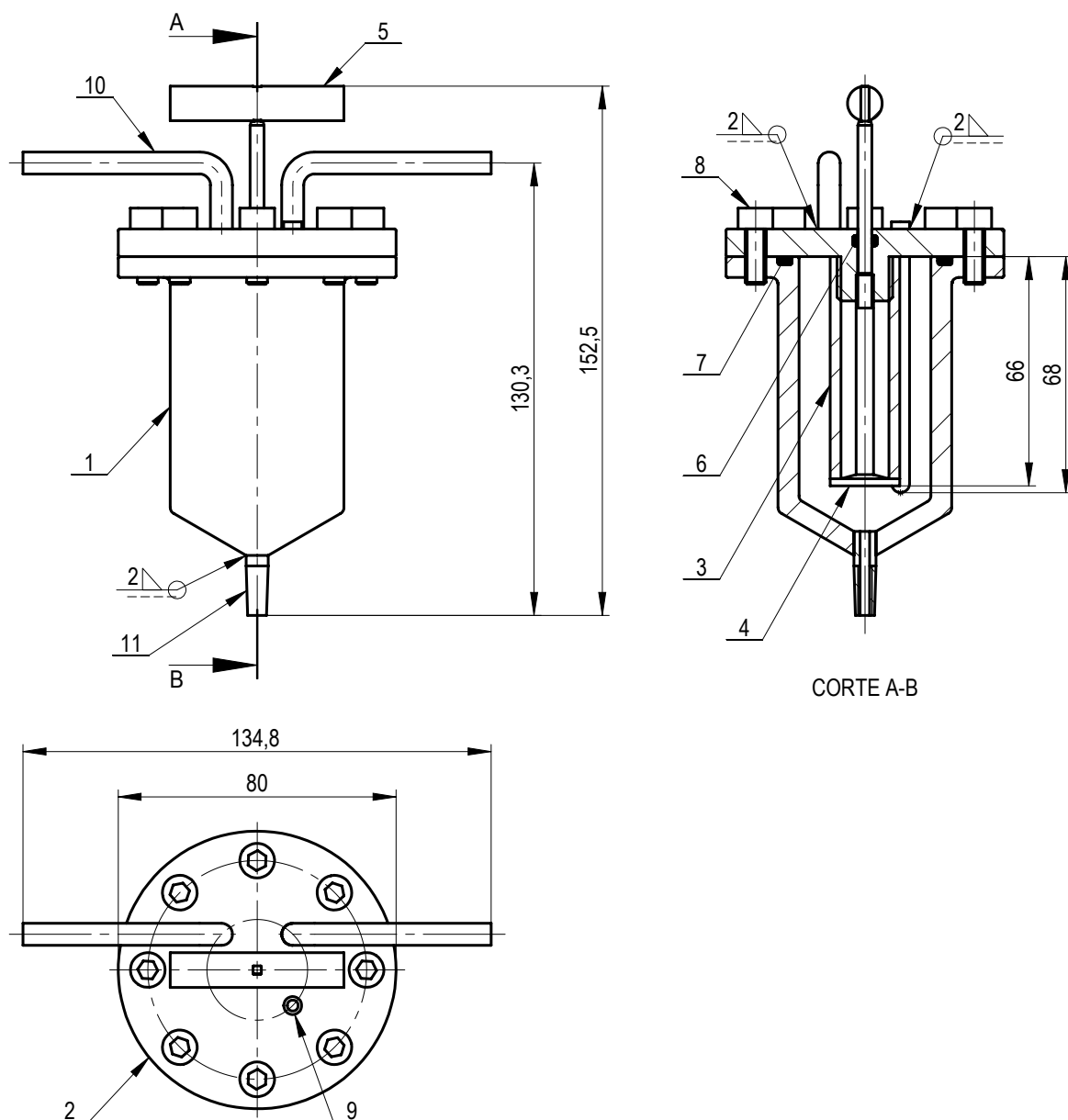
Proj.			<i>Equipamento de laboratório para estudo de reações bioquímicas</i>	F.C.T.-U.N.L <i>Dissertação em Engenharia Mecânica</i>		
Des.	13/03/2019	Pedro Cabral				



1	Adaptador macho NPT	SS-4FK0-1-4	Aço Inox 316	4			
1	Válvula de retenção	CV4NFB15	Aço Inox 316	3			
1	Válvula de segurança	SS-4R3A-NE-F	Aço Inox 316	2			
1	Reator	Desenho 4		1			

Nº	DESIGNAÇÃO	Nº DA NORMA Nº DO DESENHO	MATERIAL	Nº REF.	PRODUTO SEMI ACABADO Nº DO MOLDE Nº DA MATRIZ	PESO	OBSERVAÇÕES
----	------------	------------------------------	----------	------------	--	------	-------------

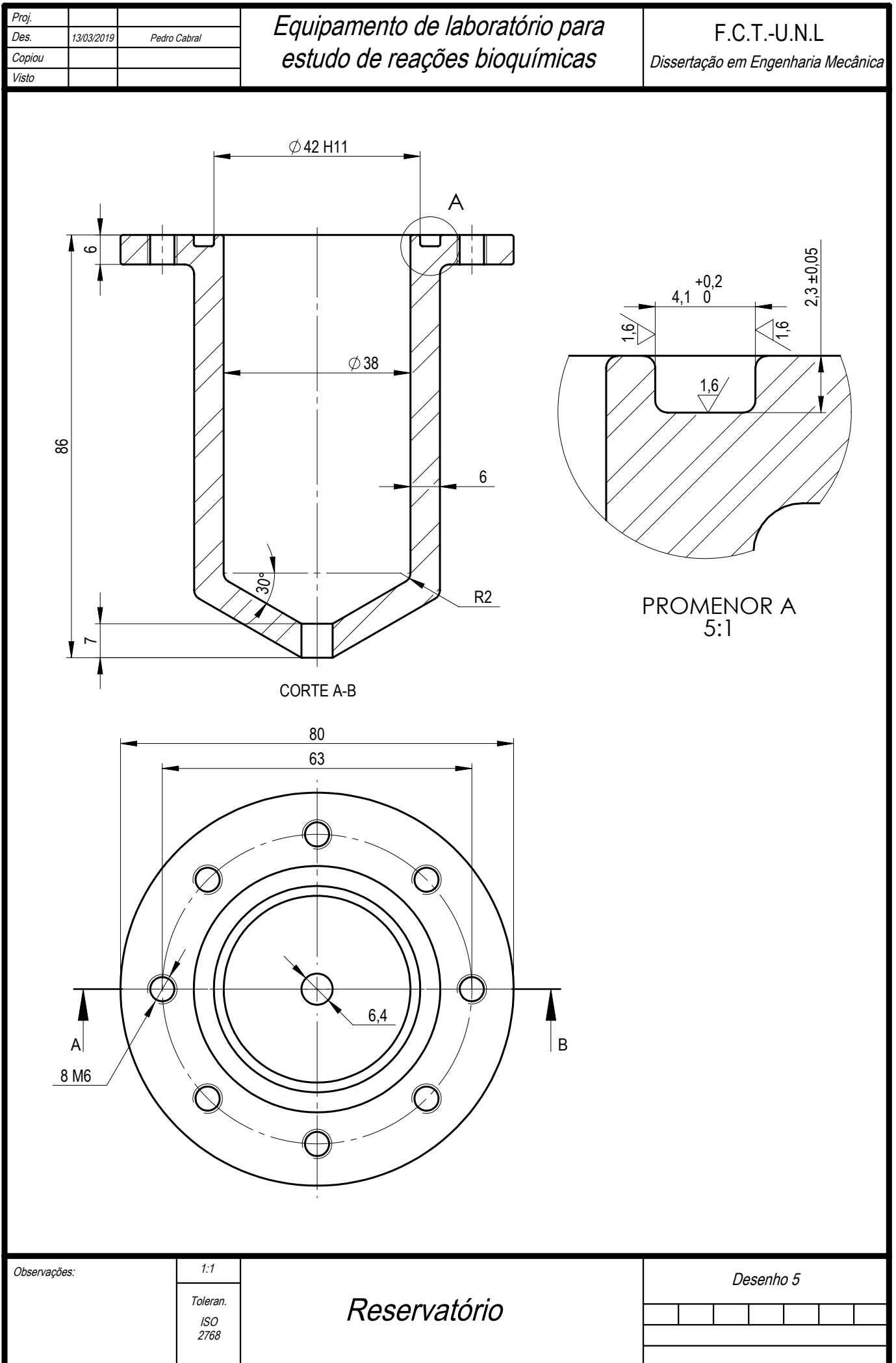
Observações:	1:2	<i>Montagem das válvulas de controlo de pressão no interior reator</i>				Desenho 3	
	Toleran. ISO 2768						

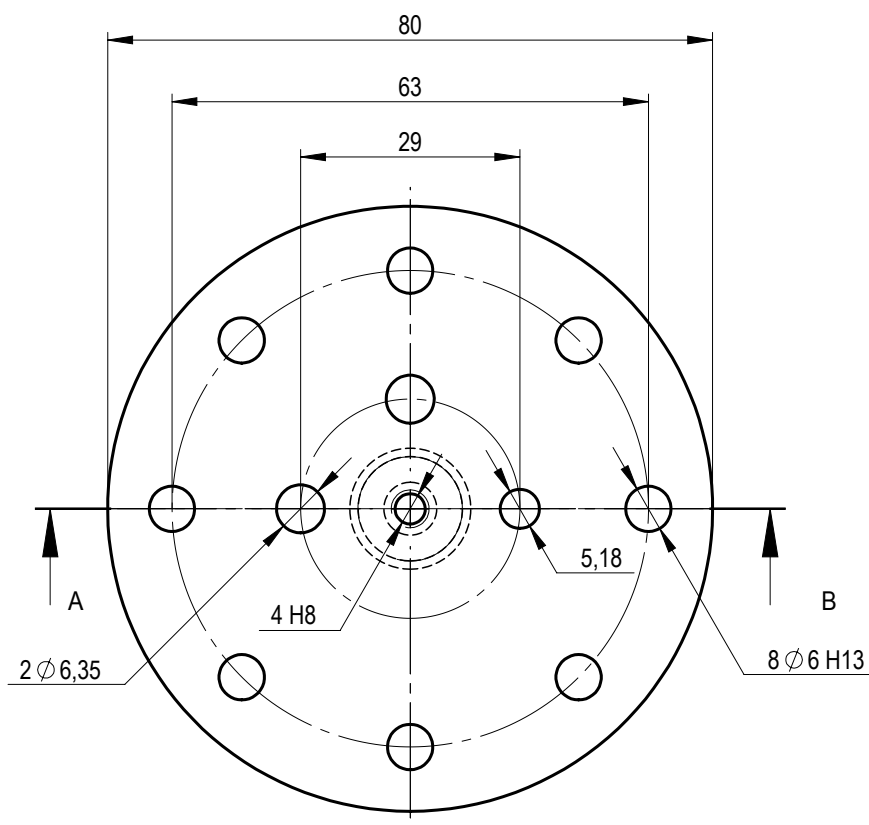
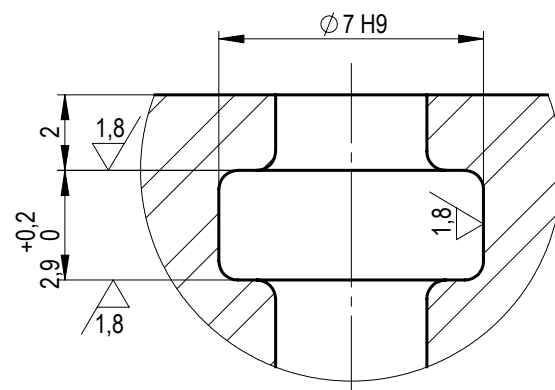
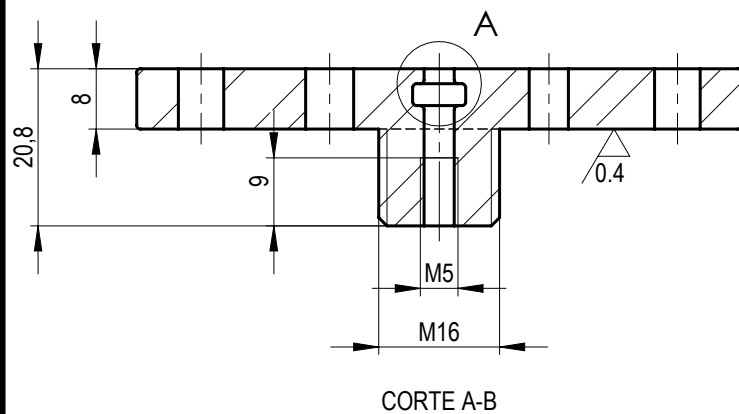


1	Tubo ligação válvula de retenção	Desenho 12	Aço Inox 316	11			
2	Tubo de admissão de pressão	Desenho 11	Aço Inox 316	10			
1	Proteção termopar	Desenho 10	Aço Inox 316	9		0,008	
8	Parafusos métricos M6	02001004242113069		8			
1	O-Ring reservatório	44 X 3 KALREZ-90	KALREZ	7			
1	O-Ring válvula de depósito	4 X 2 KALREZ-90	KALREZ	6			
1	Manivela da válvula de depósito	Desenho 9	Aço Inox 316	5		0,031	
1	Válvula de depósito	Desenho 8	Aço Inox 316	4		0,020	
1	Copo do reagente	Desenho 7	Aço Inox 316	3		0,083	
1	Tampa do reator	Desenho 6	Aço Inox 316	2		0,312	
1	Reservatório	Desenho 5	Aço Inox 316	1		0,689	

Nº	DESIGNAÇÃO	Nº DA NORMA Nº DO DESENHO	MATERIAL	Nº REF.	PRODUTO SEMI ACABADO Nº DO MOLDE Nº DA MATRIZ	PESO	OBSERVAÇÕES
Observações:		1:2	<b>Montagem do reator</b>				Desenho 4
		Toleran.					
		ISO					
		2768					







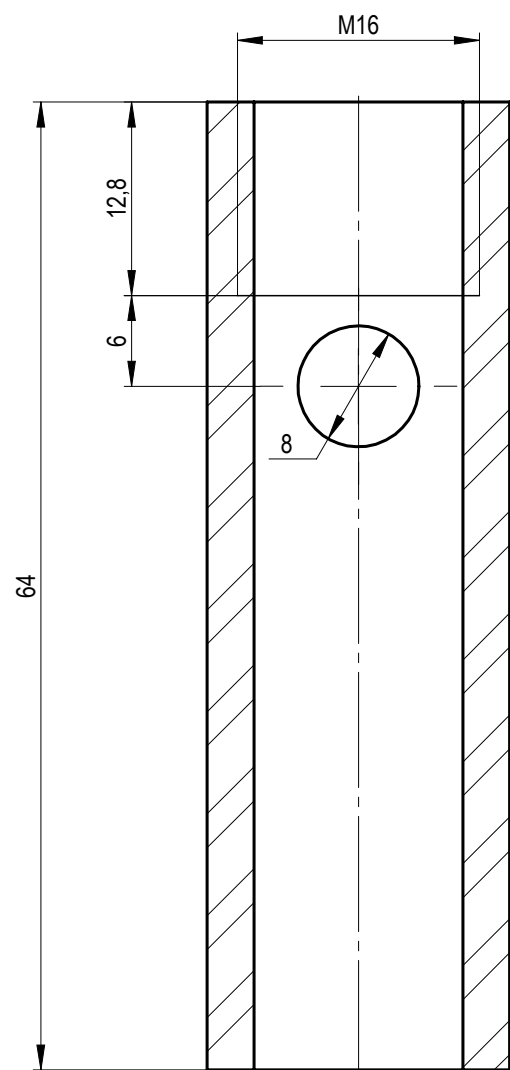
Observações:

1:1

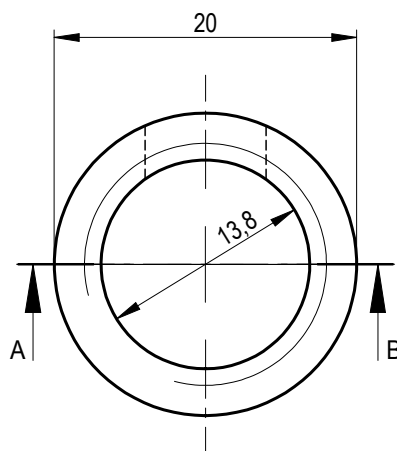
Toleran.  
ISO  
2768

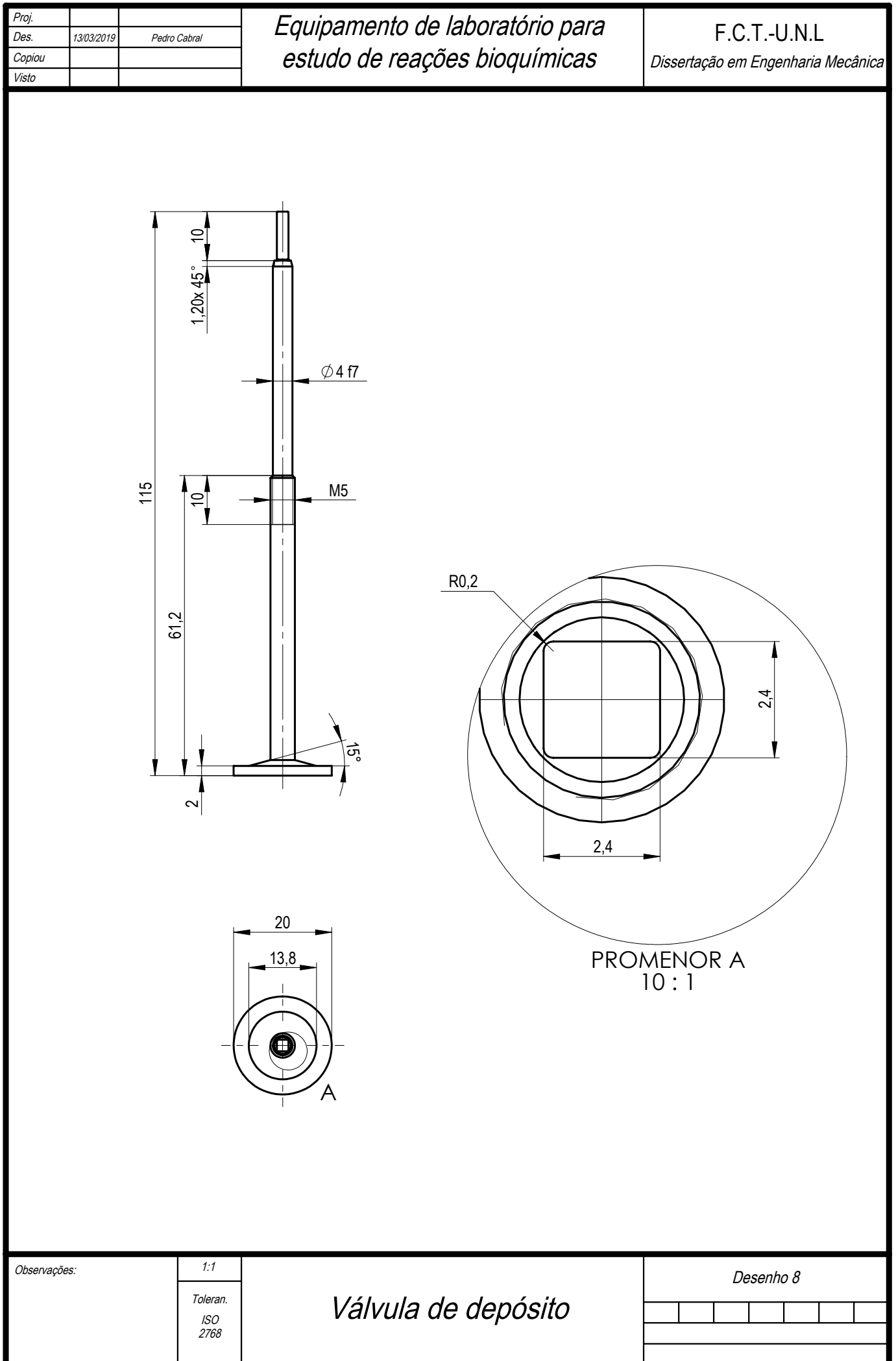
**Tampa do reator**

Desenho 6



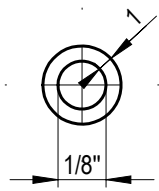
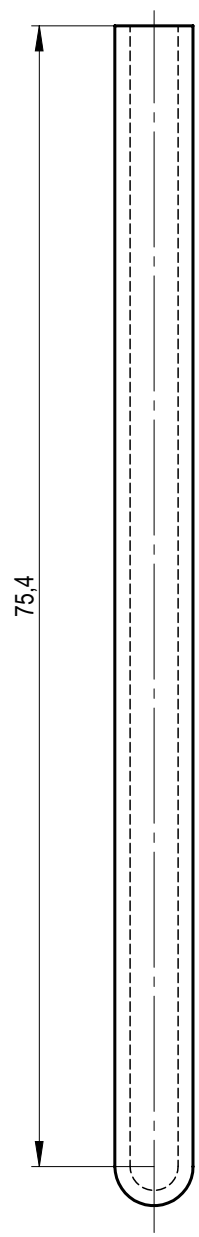
CORTE A-B

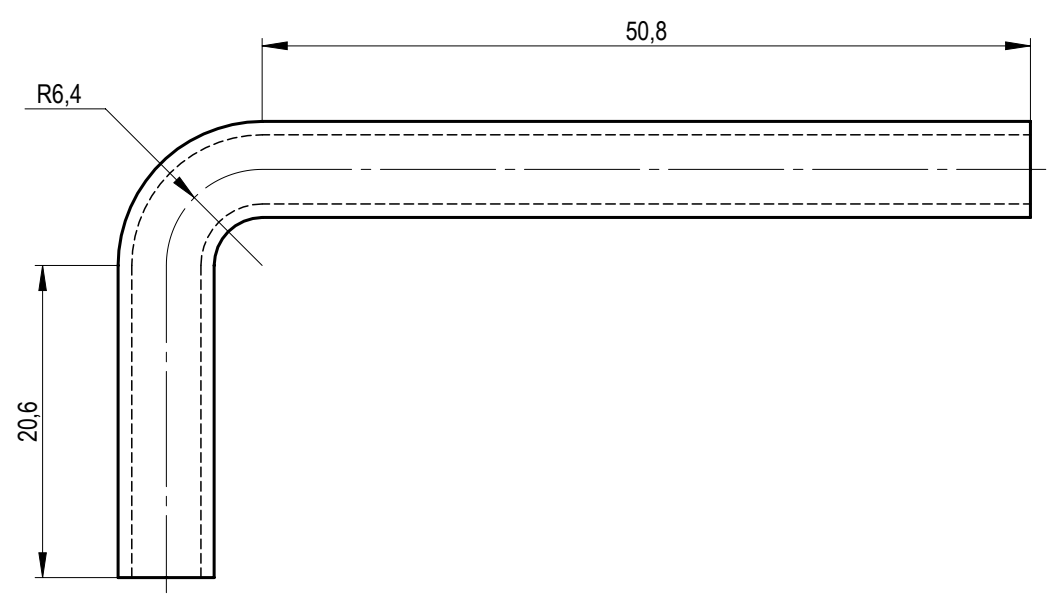
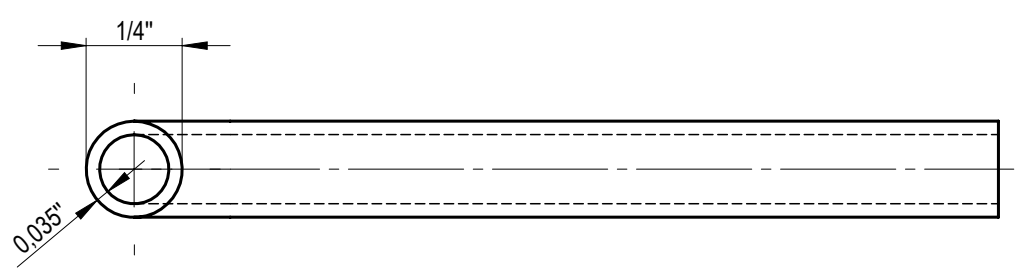


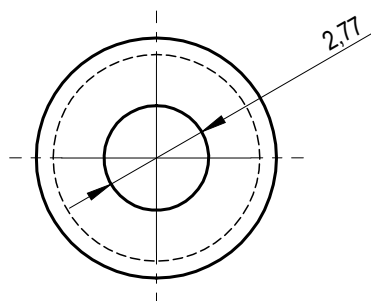
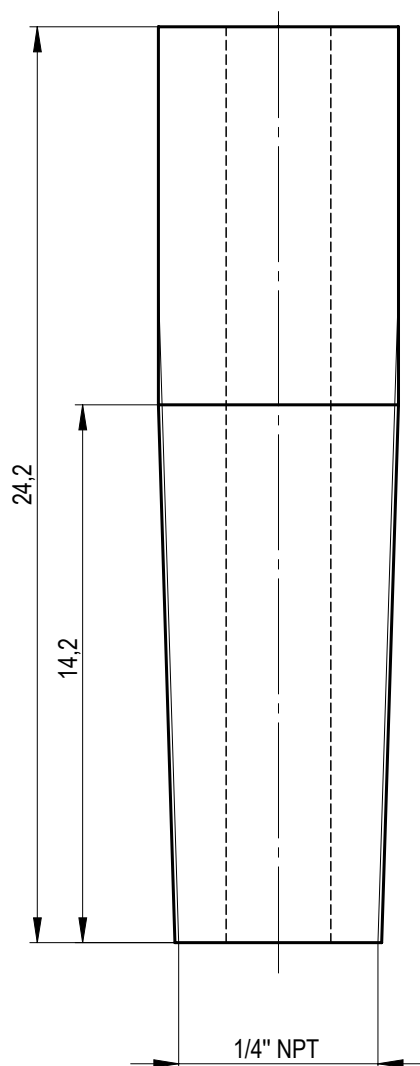


Proj.			<i>Equipamento de laboratório para estudo de reações bioquímicas</i>	F.C.T.-U.N.L <i>Dissertação em Engenharia Mecânica</i>	
Des.	13/03/2019	Pedro Cabral			
Copiou					
Visto					

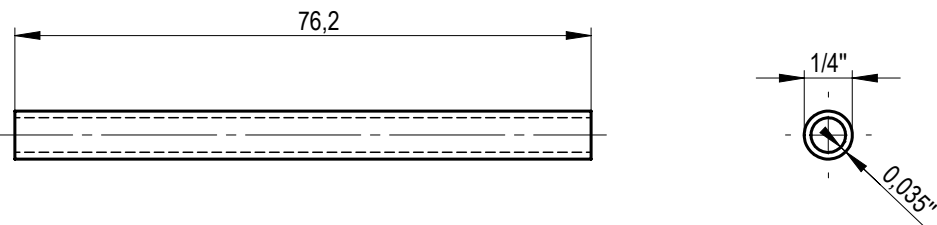
Observações:	2:1	<i>Manivela da válvula de depósito</i>	Desenho 9					
	Toleran.							
	ISO 2768							









Proj.			<i>Equipamento de laboratório para estudo de reações bioquímicas</i>	F.C.T.-U.N.L <i>Dissertação em Engenharia Mecânica</i>	
Des.	13/03/2019	Pedro Cabral			
Copiou					
Visto					
					
Observações:		1:1	<i>Tubo de ligação à válvula de 2 vias</i>	Desenho 13	
		Toleran.			
		ISO 2768			

